

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica



**ESTUDIO DE LA FIABILIDAD DE APLICACIONES
MOVIL PARA MEDIR EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Araceli Gómez Martín

2015-2016

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica

Máster en innovación tecnológica en edificación

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO DE LA FIABILIDAD DE APLICACIONES
MOVIL PARA MEDIR EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN**

Autor

Araceli Gómez Martín

Director/a o Directores/as

David Caballol

Subdirección de Investigación, Doctorado y Postgrado

2016

Resumen

El uso de teléfonos móviles inteligentes, Smartphone, ha supuesto una revolución en cuanto al acceso a la información. En el ámbito de la construcción, las aplicaciones móviles (apps) pueden ser una ayuda, y un recurso más, para ayudarnos a desarrollar nuestro trabajo.

Es las plataformas de distribución digital de aplicaciones móviles se ofertan muchas aplicaciones de medición de tiempo de reverberación, que utilizan el micrófono incorporado de los Smartphones para realizar la medición (o por medio de un micrófono externo para aplicaciones más sofisticadas). El uso de teléfonos inteligentes en aplicaciones de medición de sonido puede tener un profundo impacto en el control del ruido en edificación pues muchos teléfonos inteligentes pueden potencialmente convertirse en un sonómetro; sin embargo, para que esta aplicación pueda tener aceptación debe cumplir con ciertos criterios mínimos de funcionalidad, exactitud y precisión.

Por ello, se ha realizado un estudio para saber si se puede confiar en realizar una evaluación precisa del entorno ambiental empleando un Smartphone.

Para ello seleccionaron una de las aplicaciones que se ofertan, teniendo en cuenta el precio, precisión en la proporción de los datos, valoración por los usuarios, etc....y se estudia con una muestra representativa de diferentes smartphones.

Las mediciones que se llevaron a cabo se realizaron en un aula de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Politécnica de Madrid, realizando una comparación entre las medidas dadas por medio de la aplicación y las realizadas mediante ensayo convencional in situ y la estimación por medio de la fórmula de Sabine.

Una vez realizada esta comparación se puede concluir que los resultados obtenidos mediante la aplicación móvil elegida no se pueden considerar fiables ya que nos dan resultados muy dispares a los obtenidos mediante los otros dos métodos y obtenemos tiempos de reverberación extremadamente altos.

Abstract

The use of smartphones, has supposed a revolution as to the access to the information in the area of the construction, the apps can be helpful, and a recourse more, for help us to develop our job.

In the platforms of digital distribution to mobile applications offering a lot of apps of time measurement the reverberation, that use the built-in microphone in the smartphone to make the measure (or by means of a external microphone for apps more sophisticated). The use of smartphones in apps of sound measure can have a profound impact in the control of noise in building, for there are many smartphones can potentially become in a sound level meter; however for that this app can have acceptance must comply with minimum certain criterias of functionality, accuracy and precision.

That is why we make a research to know if we can rely to perform an accurate evaluation of environmental setting using a smartphones.

For this reason, they select one of the applications that are offered, taking into account the price, precision in the proportion of the data, valuations by users, etc...and it is studied with a representative sample of different smartphones.

The measures carried out was made in a classroom in the superior technical school of building in the polytechnic in Madrid making a comparison between the measures given by means of the application and making though the conventional test in situ and the estimate through of formula sabine.

Once this comparison has been made, we can conclude that the results obtained though ok mobile application can't consider reliable, because it give us mixed results that the obtained though the other two methods, like it give us time extremely high of reverberation.

Índice general

Resumen	iv
Abstract	v
Índice general	6
1. INTRODUCCIÓN:.....	8
1.2. El sonido	8
1.3. Percepción humana de las ondas sonoras.....	8
1.4. Longitud de onda y frecuencia	9
1.5. La amplitud	11
1.6. Presión sonora.....	12
1.7. La escala de decibelios A [dBA]	14
1.8. Fenómenos físicos que afectan a la propagación del sonido.....	15
1.9. Reverberación.....	16
2. NORMATIVA:.....	17
2.1. Código técnico de la edificación, documento Básico HR Protección frente al ruido: 17	
2.1.1. Valores límite de tiempo de reverberación según el CTE DB HR Protección frente al ruido:	18
2.1.2. Tiempo de reverberación y absorción acústica	19
2.2. UNE-EN ISO 3382-2: Acústica Medición de parámetros acústicos en recintos Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios	21
2.2.1. Condiciones de medición	22
3. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	25
3.1. Medición in situ:	28
4. OBJETIVOS:.....	32
4.1. Objetivos generales:	32
4.2. Objetivos específicos:	32
5. METODOLOGÍA:	33
5.1. Razones por las que medir el tiempo de reverberación in situ.....	33
5.2. Smartphone y sistema operativo elegido para el estudio:.....	34
5.2.1. Características Smartphone:	37

5.3.	Aplicaciones que miden el tiempo de reverberación:.....	38
5.4.	Características del recinto de ensayo:.....	41
5.5.	Ensayo convencional in situ:	42
5.5.1.	Equipo necesario para realizar la medición:	42
5.5.2.	Posiciones de medición:.....	44
5.6.	Estimación del tiempo de reverberación mediante formula de Sabine:.....	46
5.7.	Ensayo con smartphones.....	47
5.7.1.	Equipo necesario para realizar la medición:	47
5.7.2.	Posición de los equipos.....	47
6.	RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSION.....	48
6.1.	Ensayos sin absorbentes:	48
6.1.1.	Ensayo mediante aplicación móvil:.....	48
6.1.2.	Ensayo convencional in situ:	53
6.1.3.	Estimación mediante formula de Sabine:	57
6.2.	Ensayos con absorbentes:	58
6.2.1.	Ensayo mediante aplicación móvil:.....	58
6.2.2.	Ensayo convencional in situ:	60
6.2.3.	Estimación mediante fórmula de Sabine:	63
7.	CONCLUSIONES.....	64
8.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	66
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXO I	69
ANEXO II	74
ANEXO III	77

1. INTRODUCCIÓN:

1.2. El sonido

El sonido es una onda mecánica que se propaga a través de la materia, en estado gaseoso, líquido o sólido.

Es una sensación, en el órgano del oído, producida por el movimiento ondulatorio en un medio elástico, normalmente el aire. Es debido a rapidísimos cambios de presión, generados por el movimiento vibratorio de un cuerpo sonoro, que le llamaremos fuente sonora.

La propagación de la perturbación sonora se produce por la compresión y expansión del medio por el que se propagan. La elasticidad del medio permite que cada partícula transmita la perturbación a la partícula adyacente, dando origen a un movimiento encadena. Esta vibración u oscilación es de apenas unas diezmilésimas de centímetro.

La función del medio transmisor es fundamental, ya que el sonido no se propaga en el vacío. Por ello, para que exista el sonido, es necesaria una fuente de vibración mecánica y también un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso) a través del cual se propague la perturbación. El aire es el medio transmisor más común del sonido. La velocidad de propagación del sonido en el aire es de aproximadamente 343 m/seg. A una temperatura de 20 °C (293 kelvin).[1]

1.3. Percepción humana de las ondas sonoras

Cuando un objeto emisor (fuente sonora) vibra, hace vibrar también al aire que se encuentra alrededor de él. Esa vibración, que la llamamos sonido, se transmite en la distancia llegando a nuestro oído. La oreja capta las ondas sonoras que se transmiten a través del conducto auditivo hasta el tímpano. El tímpano es una membrana flexible que vibra cuando le llegan las ondas sonoras, esta vibración llega a la cadena de huesecillos: martillo, yunque y estribo, que amplifican el sonido y lo transmite al oído interno a través de la ventana oval. Finalmente las vibraciones "mueven" los dos líquidos que existen en la cóclea (perilinfa y endolinfa), deformando las células ciliadas existentes en el interior. Estas células transforman las ondas sonoras en impulsos eléctricos que llegan al nervio auditivo y de este nervio a la corteza auditiva que

es el órgano encargado de interpretar y decodificar la sensación. A esa sensación se le denomina "sonido".

El hercio (Hz) es la unidad que expresa la cantidad de vibraciones que emite una fuente sonora por unidad de tiempo (frecuencia). El oído humano puede percibir ondas sonoras de frecuencias entre los 16 y los 20.000 Hz. Las ondas que poseen una frecuencia inferior a los 16 Hz se denominan infrasónicas y las superiores a 20.000 Hz, ultrasónicas. [2]

1.4. Longitud de onda y frecuencia

La longitud de onda es un parámetro físico que indica el tamaño de una onda. Se define como la distancia, medida en la dirección de propagación de la onda, entre dos puntos cuyo estado de movimiento es idéntico, como por ejemplo crestas o valles adyacentes. Por lo general se denota con la letra griega lambda (λ). En la Figura 1 se puede observar una representación gráfica de una onda y su longitud de onda.

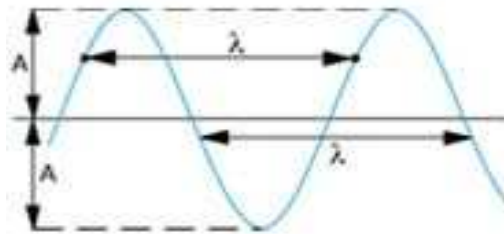


Figura 1: Representación gráfica de longitud de onda

Frecuencia, es una medida para indicar el número de repeticiones de cualquier fenómeno o suceso periódico en una unidad de tiempo.

La frecuencia tiene una relación inversa con el concepto de longitud de onda, a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa.

Según el Sistema Internacional, el resultado se mide en hercios (Hz), en honor a Heinrich Rudolf Hertz. Un hercio es aquel suceso o fenómeno repetido una vez por segundo, 2 Hz son dos sucesos (períodos) por segundo y así sucesivamente. Otras unidades para indicar la frecuencia son revoluciones por minuto (rpm) y radianes por segundo (rad/s).

En los análisis acústicos, según la precisión que se quiera obtener, se utilizan distintas frecuencias de anchos normalizados, en octavas o en tercios de octava, siendo ésta última la que aporta mayor precisión dado que da más información. Se denomina octava cada vez que la frecuencia multiplica por dos

su valor, para tener una información más representativa se divide una banda de octava en tres terceras partes denominadas tercios de octava.

Un ser humano sano es capaz de percibir sonidos con una frecuencia entre los 20 Hz y los 20 kHz, no obstante este rango puede variar según la edad y salud de la persona. Por debajo de estas frecuencias se encuentran los denominados infrasonidos, y por encima de los 20 kHz se denominan ultrasonidos. Las normativas que regulan la edificación sólo consideran el uso del rango de los 100 Hz hasta los 5000 Hz.

En la tabla 1 se pueden observar las frecuencias usadas en edificación.

Tabla 1. Frecuencias usadas en Edificación	
Octavas (Hz)	Tercios de octava (Hz)
150	100
	125
	160
250	200
	250
	315
500	400
	500
	630
1000	800
	1000
	1250
2000	1600
	2000
	2500
4000	3150
	4000
	5000

Los elementos y sistemas constructivos dependen de la frecuencia, así como la respuesta del oído humano. Desde el punto de vista de la audición del ser humano podemos distinguir las siguientes frecuencias que determinan el tono de un sonido:

- Bajas frecuencias: son sonidos graves, tienen una frecuencia de entre 100 y 250 Hz.
- Medias frecuencias: sonidos intermedios, son lo que predominan en la voz humana, están entre 250 y 2000 Hz.
- Altas frecuencias: son sonidos agudos, están entre 2000 y 5000 Hz.[2]

1.5. La amplitud

En acústica la amplitud es la cantidad de presión sonora que ejerce la vibración en el medio elástico (aire). Al mismo tiempo, la amplitud determina la cantidad de energía (potencia acústica) que contiene una señal sonora.

No hay que confundir amplitud con volumen o potencia acústica, aunque es cierto que cuanto más fuerte suena un sonido, mayor amplitud tiene, porque se ejerce una presión mayor en el medio.

En definitiva, la amplitud de una onda es el valor máximo, tanto positivo como negativo, que puede llegar a adquirir la onda sinusoidal.

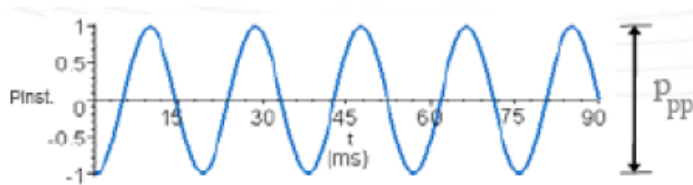


Figura 2: Representación gráfica de una onda

El valor máximo positivo que toma la amplitud de una onda sinusoidal recibe el nombre de "pico o

cresta". El valor máximo negativo, "vientre o valle". El punto donde el valor de la onda se anula al pasar del valor positivo al negativo, o viceversa, se conoce como "nodo", "cero" o "punto de equilibrio".

En sonido, normalmente, la amplitud viene definida en decibelios SPL (dBSPL): Los decibelios representan la relación entre dos señales y se basa en un logaritmo de base 10 del cociente entre dos números. Las siglas SPL hacen referencia a la presión sonora (Sound Pressure Level). [2]

1.6. Presión sonora

La presión sonora o presión acústica se utiliza para evaluar un sonido desde un punto de vista y es producto de la propia propagación del sonido. La energía provocada por las ondas sonoras generan un movimiento ondulatorio de las partículas del aire, provocando la variación alterna en la presión estática del aire (pequeñas variaciones en la presión atmosférica). (La presión atmosférica es la presión del aire sobre la superficie terrestre). La razón de estas variaciones de presión atmosférica es porque se producen áreas donde se concentran estas partículas (zonas de concentración) y otras áreas quedan menos saturadas (zonas de rarefacción). Las zonas con mayor concentración de moléculas tienen mayor densidad y las zonas de menor concentración tienen menor densidad. Cuando estas ondas se encuentran en su camino con el oído la presión que ejercen sobre el mismo no es igual para toda la longitud de onda.

Así pues, la presión acústica queda definida como la diferencia de presión atmosférica estática y la presión instantánea (cuando la onda sonora alcanza al oído). La presión atmosférica se mide en pascales (Pa). En el SI (Sistema Internacional) 1 Pascal es igual a una fuerza de 1 newton actuando sobre una superficie de 1 metro cuadrado. La presión atmosférica se sitúa en torno a los 100.000 Pa (estableciéndose como valor normalizado los 101.325 Pa).

El umbral de dolor se sitúa en los 20 Pa, mientras que el umbral de audición se sitúa en los 20 micro pascales.

La principal diferencia entre presión atmosférica y presión sonora es que, mientras que la presión atmosférica cambia muy lentamente, la presión sonora, alterna muy rápidamente entre valores negativos (menores que la presión atmosférica) y positivos (mayores). El número de veces que se repite un fenómeno por unidad de tiempo es lo que en física se denomina frecuencia.

El hombre no tiene sensibilidad ante todas las frecuencias. El margen de frecuencias que pueden producir la sensación de sonido cuando impresiona el oído humano es lo que se conoce como audiofrecuencias y va de los 20 a los 20,000. No hay que confundir presión acústica con potencia acústica. La confusión viene por el hecho de que la presión sonora es la responsable directa de la amplitud de la onda y la amplitud determinara la cantidad de energía (potencia acústica) que contiene una señal sonora.

Para diferenciar entre sonidos más intensos (el oído soporta mayor cantidad de presión sonora), de sonidos débiles, se utiliza el llamado nivel de presión sonora.

El nivel de presión sonora determina la intensidad del sonido que genera una presión sonora instantánea (es decir, del sonido que alcanza a una persona en un momento dado) y varía entre 0 dB umbral de audición y 120 dB umbral de dolor.

Para medir el nivel de presión sonora no se suele utilizar el Pascal, por el amplio margen que hay entre la sonoridad más intensa y la más débil (entre 20 Pa y 20 microPa). Normalmente se adopta una escala logarítmica porque el oído no percibe los sonidos en escala lineal, sino como una escala logarítmica. Y se utiliza como unidad el decibelio porque es adimensional y relativo, para medir valores absolutos se necesita especificar a qué unidades está referida. En el caso del nivel de presión sonora (sound level dB SPL) toma como unidad de referencia 1 microbar. Precisamente, las siglas SPL hacen referencia al nivel de presión sonora (Sound Pressure Level).

Para medir el nivel de presión sonora se utiliza la fórmula:

$$NP = Lp = SPL = 20 \log \left(\frac{P_{ef}}{P_0} \right) \quad (I)$$

$$P_0 = 20 \mu Pa = 0,00002 Pa \quad (II)$$

En donde:

- P_{ef} es la presión sonora instantánea.
- P_0 es la presión de referencia y se toma como referencia la presión sonora en el umbral de audición, que son 20 microPa.
- \log es un logaritmo decimal (en base 10, de ahí, decibelio)

Es decir, el nivel de presión acústica se expresa como 20 veces el logaritmo decimal de la relación entre una presión acústica y una de presión de referencia determinada. [1].

1.7. La escala de decibelios A [dBA]

El oído humano es extremadamente sensible a las frecuencias medias y mucho menos sensible a las frecuencias extremas (altas o bajas).

Para adaptar el nivel de presión sonora (dB) a la sensibilidad del oído humano se aplican unas correcciones y se obtienen niveles ponderados. La ponderación más utilizada, ya que es la que mejor refleja la respuesta del oído para niveles habituales de ruido, es la curva de ponderación

A, que se expresa en tercios de octava, obteniendo a partir de ella niveles ponderados A (dBA). [2]

Frecuencia (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Curva de ponderación (dBA)	-19,1	-16,1	-13,4	-10,9	-8,6	-6,6	-4,8	-3,2	-1,9

Frecuencia (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Curva de ponderación (dBA)	-0,8	0	0,6	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,5

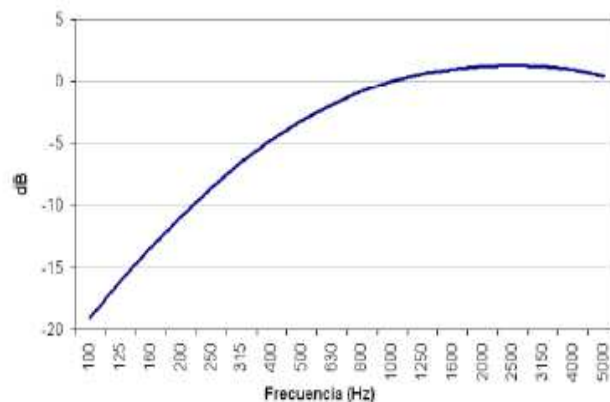


Figura 3: Curva de Ponderación A (Fuente: Documento básico HR de Protección frente el Ruido.)

1.8. Fenómenos físicos que afectan a la propagación del sonido

Absorción: Cuando una onda sonora alcanza una superficie, una parte de su energía se refleja, pero un porcentaje de ésta es absorbida por el nuevo medio.

Reflexión. Una onda cuando topa con un obstáculo que no puede traspasar se refleja (vuelve al medio del cual proviene).

Transmisión. En muchos obstáculos planos (las paredes de los edificios) una parte de la energía se transmite al otro lado del obstáculo. La suma de la energía reflejada, absorbida y transmitida es igual a la energía sonora incidente (original).

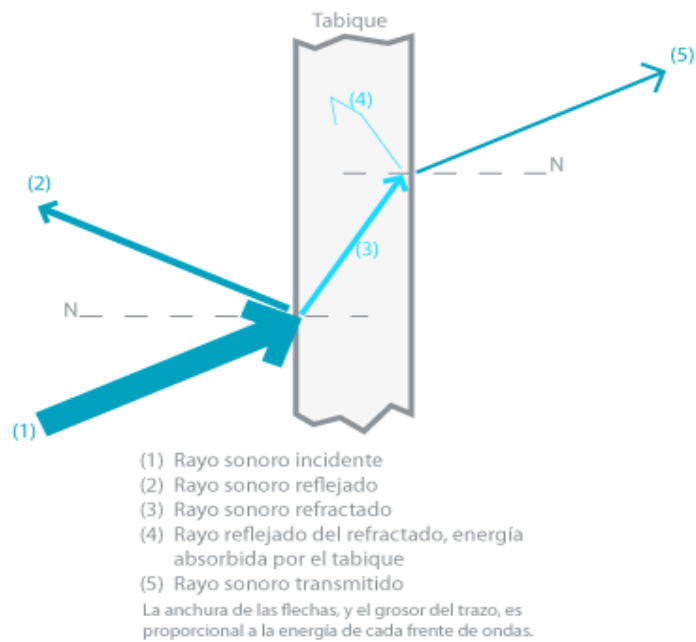


Figura 4: fenómenos físicos de la propagación del sonido

Difusión. Si la superficie donde se produce la reflexión presenta alguna rugosidad, la onda reflejada no solo sigue una dirección sino que se descompone en múltiples ondas.

Refracción. Es la desviación que sufren las ondas en la dirección de su propagación, cuando el sonido pasa de un medio a otro diferente. La refracción se debe a que al cambiar de medio, cambia la velocidad de propagación del sonido.

Difracción. Se llama difracción al fenómeno que ocurre cuando una onda acústica se encuentra un obstáculo de dimensiones menores a su longitud de onda (λ), esta es capaz de rodearlo atravesándolo. Otra forma de difracción es la capacidad de las ondas de pasar por orificios cambiando su divergencia a esférica con foco en el centro de éstos. [3]

1.9. Reverberación

La reverberación es un fenómeno derivado de la reflexión del sonido. Consistente en una ligera prolongación del sonido una vez que se ha extinguido el original, debido a las ondas reflejadas. Estas ondas reflejadas sufrirán un retardo no superior a $1/10$ de segundo o de 34 metros, que es el valor de la persistencia acústica. Cuando el retardo es mayor ya no hablamos de reverberación, sino de eco.

En un recinto pequeño la reverberación puede resultar inapreciable, pero cuanto mayor es el recinto, mejor percibe el oído este retardo o ligera prolongación del sonido. Para determinar cómo es la reverberación en un determinado recinto se utiliza una serie de parámetros físicos, uno de ellos es conocido como tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación es el tiempo que transcurre en un determinado recinto, desde que se produce un determinado sonido, hasta que la intensidad de ese sonido disminuye a una millonésima de su valor original.

Al tiempo de reverberación también le llamamos TR60, al ser el tiempo transcurrido (medido en segundos) en decrecer 60 dB la energía que recibe el receptor, al parar bruscamente la fuente de excitación.

El tiempo de reverberación es uno de los principales parámetros indicadores de la calidad acústica de una sala. Su valor depende de numerosos factores: el coeficiente de absorción de los materiales de la sala, el volumen, superficie, y el dimensionado de ésta entre otros.[1]

2. NORMATIVA:

Para la realización de los cálculos y los ensayos del presente estudio se han tenido en cuenta la siguiente normativa:

- **Código técnico de la Edificación, documento Básico HR Protección Frente al ruido**
- **UNE-EN-ISO 3382-2: 2008 Acústica; Medición de parámetros acústicos en recintos; Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios**

2.1. Código técnico de la edificación, documento Básico HR Protección frente al ruido:

El CTE se deberá aplicar a cualquier edificación de nueva construcción cuyo proyecto precise de licencia o autorización legalmente exigible, exceptuando las construcciones de sencillez técnica y escasa entidad constructiva, que no tengan carácter residencial o público que se desarrollen en una sola planta y no afecten a la seguridad de las personas.

También se deberá aplicar a las obras de ampliación, reforma o rehabilitación en edificios existentes, siempre y cuando dichas obras sean compatibles con la naturaleza de la intervención o con el grado de protección del edificio.

En los cambios del uso característico del edificio, aunque ello no implique necesariamente la realización de obras, deberá comprobarse el cumplimiento de las exigencias básicas del CTE.

El objetivo del requisito básico “Protección frente el ruido” consiste en limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

El DB-HR nos obliga a proyectar y construir los edificios considerando:

- Aislamiento acústico al ruido aéreo.
- Aislamiento acústico al ruido de impacto.
- Control del ruido y de las vibraciones de las instalaciones.

El Documento Básico “DB HR Protección frente al ruido” especifica parámetros objetivos y sistemas de verificación cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de protección frente al ruido.

2.1.1. Valores límite de tiempo de reverberación según el CTE DB HR Protección frente al ruido:

En conjunto los elementos constructivos, acabados superficiales y revestimientos que delimitan un aula o una sala de conferencias, un comedor y un restaurante, tendrán la absorción acústica suficiente de tal manera que:

- El tiempo de reverberación en aulas y salas de conferencias vacías (sin ocupación y sin mobiliario), cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,7 s.
- El tiempo de reverberación en aulas y en salas de conferencias vacías, pero incluyendo el total de las butacas, cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,5 s.
- El tiempo de reverberación en restaurantes y comedores vacíos no será mayor que 0,9 s.

Para limitar el ruido reverberante en las zonas comunes los elementos constructivos, los acabados superficiales y los revestimientos que delimitan una zona común de un edificio de uso residencial público, docente y hospitalario colindante con recintos protegidos con los que comparten puertas, tendrán la absorción acústica suficiente de tal manera que el área de absorción acústica equivalente, A, sea al menos 0,2 m² por cada metro cúbico del volumen del recinto.

2.1.2. Tiempo de reverberación y absorción acústica

2.1.2.1. Datos previos y procedimiento

Para satisfacer los valores límite del tiempo de reverberación requeridos en aulas y salas de conferencias de volumen hasta 350 m³, restaurantes y comedores, puede elegirse uno de los dos métodos que figuran a continuación:

a) el método de cálculo general del tiempo de reverberación a partir del volumen y de la absorción acústica de cada uno de los recintos.

b) el método de cálculo simplificado del tiempo de reverberación, que consiste en emplear un tratamiento absorbente acústico aplicado en el techo. Este método sólo es válido en el caso de aulas de volumen hasta 350 m³, restaurantes y comedores.

En el caso de aulas y salas de conferencias, ambas opciones son aplicables si los recintos son de formas prismáticas rectas o asimilables.

Para calcular el tiempo de reverberación y la absorción acústica, deben utilizarse los valores del coeficiente de absorción acústica medio, α_m , de los acabados superficiales, de los revestimientos y de los elementos constructivos utilizados y el área de absorción acústica equivalente medio, AO_m , de cada mueble fijo, obtenidos mediante mediciones en laboratorio según los procedimientos indicados en la normativa correspondiente contenida en el anejo C o mediante tabulaciones incluidas en el Catálogo de Elementos Constructivos u otros Documentos Reconocidos del CTE.

En caso de no disponer de valores del coeficiente de absorción acústica medio α_m de productos, podrán utilizarse los valores del coeficiente de absorción acústica ponderado, α_w de acabados superficiales, de los revestimientos y de los elementos constructivos de los recintos

Debe diseñarse y dimensionarse, como mínimo, un caso de cada recinto que sea diferente en forma, tamaño y elementos constructivos.

Independientemente de lo especificado en este apartado, en el Anejo J se incluyen una serie de recomendaciones de diseño para aulas y salas de conferencias.

2.1.2.2. Método de cálculo general del tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (T) de un recinto se calcula mediante la expresión:

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad [s] \quad (III)$$

Siendo:

- V volumen del recinto [m³]
- A absorción acústica total del recinto [m²]

La absorción acústica (A) se calculará a partir de la expresión:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^N A_{om,j} + 4 \cdot \overline{m_m} \cdot V \quad (IV)$$

Siendo

- $\alpha_{m,i}$ coeficiente de absorción acústica medio de cada paramento, para las bandas de tercio de octava centradas en las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz;
- S_i área de paramento cuyo coeficiente de absorción es α_i , [m²]
- $A_{om,j}$ área de absorción acústica equivalente media de cada mueble fijo absorbente diferente [m²];
- V volumen del recinto, [m³].
- m_m coeficiente de absorción acústica medio en el aire, para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz y de valor 0,006 m⁻¹.

El término $4m_m V$ es despreciable en los recintos de volumen menor que 250 m³. [4]

2.2. UNE-EN ISO 3382-2: Acústica Medición de parámetros acústicos en recintos Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios

La Norma ISO 3382-2 especifica los métodos de medición del tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Describe el procedimiento de medición, el equipo necesario, el número de posiciones de medición requerido y el método para evaluar los datos y presentar el informe de ensayo.

Los resultados de la medición se pueden utilizar para la corrección de otras mediciones acústicas, por ejemplo, el nivel de presión acústica de las fuentes sonoras o las mediciones del aislamiento acústico, y para comparación con los requisitos del tiempo de reverberación en los recintos.

Especifica tres niveles de exactitud de la medición: control, ingeniería y precisión. La principal diferencia se refiere al número de posiciones de medición y por lo tanto al tiempo requerido para realizar las mediciones. En el presente proyecto hemos realizado las mediciones mediante el nivel de ingeniería.

En esta Norma ISO 3382-2 se definen dos rangos de evaluación diferentes, 20 dB y 30 dB. Sin embargo, se ha dado preferencia al rango de evaluación de 20 dB por varias razones:

- la evaluación subjetiva de la reverberación está relacionada con la primera parte del decrecimiento del sonido.
- para estimar el nivel acústico estacionario en un recinto a partir de su tiempo de reverberación, conviene utilizar la primera parte del decrecimiento
- la relación señal/ruido representa a menudo un problema en las mediciones de campo, y a veces es difícil o imposible obtener un rango de evaluación de más de 20 dB. Esto requiere un nivel de señal/ruido de al menos 35 dB.

2.2.1. Condiciones de medición

Esta norma nos indica que las mediciones del tiempo de reverberación se deberían realizar en un recinto sin personas pero que sin embargo, se puede permitir que un recinto represente su estado de vacío con hasta dos personas presentes, salvo que se especifique lo contrario. Se tendrá que tener en cuenta cuando el resultado de la medición se utilice para la corrección de un nivel de presión acústica medido, el número de personas presentes en el recinto debería ser el mismo para esa medición.

En recintos grandes, la atenuación por el aire puede contribuir de manera significativa a la absorción acústica a frecuencias elevadas. Para las mediciones de precisión, se debe medir la temperatura y la humedad relativa del aire en el recinto.

La importancia de la contribución de la absorción del aire es baja si el tiempo de reverberación es inferior a 1,5 s a 2 kHz e inferior a 0,8 s a 4 kHz. En este caso, no es necesario medir la temperatura y la humedad relativa.

Esta norma también nos indica el tipo de equipos que debemos usar y las posiciones de estos equipos.

2.2.1.1. *Procedimientos de Medición:*

En esta parte de la Norma ISO 3382 se describen dos métodos para medir el tiempo de reverberación, el método del ruido interrumpido que será en el que nos centraremos ya que es el realizado en el proyecto y el método de la respuesta impulsiva integrada.

Ambos métodos tienen el mismo valor teórico. El rango de frecuencias depende del propósito de las mediciones. Cuando no existan requisitos para bandas de frecuencia específicas, el rango de frecuencias debería cubrir al menos 250 Hz a 2 000 Hz para el método de control. Para los métodos de ingeniería y de precisión, el rango de frecuencias debería cubrir al menos 125 Hz a 4 000 Hz en bandas de octava, o 100 Hz a 5 000 Hz en bandas de un tercio de octava.

Método del ruido interrumpido

Se debe utilizar un altavoz y la señal que recibe debe proceder de un ruido eléctrico de banda ancha aleatorio o pseudo-aleatorio. Si se utiliza un ruido pseudo-aleatorio, se debe parar aleatoriamente, sin utilizar una secuencia repetida. La fuente debe ser capaz de producir un nivel de presión acústica suficiente para garantizar una curva de decrecimiento que empiece al menos 35 dB por encima del ruido de fondo en la banda de frecuencias correspondiente. Si se tiene que medir T_{30} , es necesario crear un nivel al menos 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo.

Para las mediciones en bandas de octava, el ancho de banda de la señal debe ser mayor o igual a una octava; para las mediciones en bandas de un tercio de octava, el ancho de banda de la señal debe ser mayor o igual a un tercio de octava. El espectro debe ser razonablemente plano en la banda de octava a medir. Alternativamente, el espectro de ruido de banda ancha se puede corregir para ofrecer un espectro de ruido rosa estacionario reverberante en el recinto entre 88 Hz y 5 657 Hz. De esta forma, el rango de frecuencias cubre las bandas de un tercio de octava con frecuencias medias desde 100 Hz a 5 kHz o bandas de octava desde 125 Hz a 4 kHz.

Para los métodos de ingeniería y de precisión, la duración de excitación del recinto debe ser suficiente para que el campo acústico alcance un estado estacionario antes de apagar la fuente. Por lo tanto, es esencial emitir el ruido durante al menos $T/2$ s. En recintos grandes, la duración de la excitación debe ser de al menos unos segundos.

Para el método de control, se puede utilizar una excitación corta o una señal impulsiva como alternativa a la señal de ruido interrumpido. Sin embargo, en ese caso, la presión de medición es inferior a la descrita en el apartado 4.3.1.

El número de posiciones de micrófono utilizadas se determinará por la precisión requerida. Sin embargo, teniendo en cuenta el carácter aleatorio inherente a la señal de la fuente, es necesario calcular el promedio a partir de un número de mediciones en cada posición para obtener una incertidumbre de medición aceptable. El promedio se puede calcular de dos formas:

Hallando los tiempos de reverberación individuales para todas las curvas de decrecimiento y tomando el valor medio; o haciendo una media del conjunto de los decrecimientos de presión acústica al cuadrado y hallando el tiempo de reverberación de la curva de decrecimiento resultante. Los decrecimientos

individuales se superponen sincronizando sus orígenes. Los valores muestreados de la presión acústica discreta al cuadrado se suman para cada incremento del intervalo de tiempo de los decrecimientos y la secuencia de estas sumas se utiliza como un decrecimiento único del conjunto a partir del cual se evalúa T . Es importante que la potencia acústica de la fuente sea idéntica para todas las mediciones. Este es el método preferido.[5]

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La acústica nos enseña cómo el sonido se produce en un punto del espacio y se expande en el mismo interaccionando de maneras diferentes dependiendo de las formas, volúmenes, materiales que encuentra en el espacio. Al mismo tiempo, el espacio que percibimos depende del sonido. Los sonidos nos informan de manera inmediata acerca de las características físicas del espacio (si es grande o pequeño, de techos altos o bajos si está abierto o cerrado, de los materiales, absorbentes o reflectantes).

Retrocediendo en el hilo histórico de los conocimientos en materia de la acústica de los teatros, los griegos dejaron ejemplos de su conocimiento en teatros como el de Epidauro. Estos conocimientos fueron desarrollados por los romanos con nuevas aplicaciones teóricas y prácticas. Vitrubio, en su tratado De architectura (Libro V, capítulo VII) dejó escritas referencias y conceptos acerca del estudio de la acústica de teatros al aire libre. Estos conocimientos iniciales se aplicaron fundamentalmente a favorecer la eficacia en la transmisión de la voz hacia el público y a buscar la adecuada inteligibilidad de la misma. En un principio para lograr la mayor presencia de la voz, ésta se reforzaba con diferentes medios. La reverberación ha existido durante muchos años en ambientes cerrados. En el año 20 A.C., el arquitecto romano Marco Vitruvio Polión describe en su única obra De Architectura varios diseños con el fin de mejorar la acústica de los antiguos teatros romanos. Una de sus propuestas era el uso de vasijas de bronce afinadas ubicadas debajo de las sillas, las cuales actuaban como resonadores sintonizados para frecuencias bajas y medias. [6]

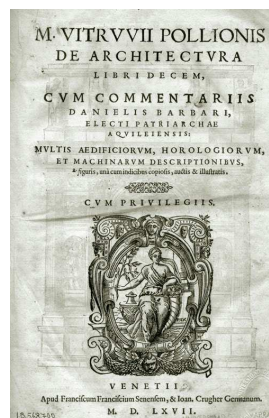


Figura 5: Portada del Libro V, Tratado de arquitectura de Vitruvio

Luego, en 1640, el matemático francés Marin Mersenner halló el tiempo de retorno del sonido en el aire por medio del eco. Lo logró calculando la velocidad del sonido con un 10% de error. En el año de 1895, el Sr. Wallace Clement Sabine investigó la reverberación para mejorar las características acústicas de la sala Fogg Lecture Hall de la Universidad de Harvard. Ésta famosa, por

poseer una acústica muy deficiente para el trabajo discursivo que se necesitaba allí; fue el escenario de trabajo para Sabine y su equipo durante tres años. Sabine, logró disminuir la reverberación del Fogg Lecture Hall al adherir en las paredes materiales absorbentes, lo que mejoró la acústica del lugar para el uso asignado. [7]

Posterior a su triunfo en Harvard, en la sala Fogg, Sabine asesoró la construcción del Boston Symphony Hall en el desarrollo de este proyecto, durante sus investigaciones, estableció una fórmula de cálculo del tiempo de reverberación que aplicó al recinto. El tiempo de reverberación lo definió como el número de segundos necesarios para que la intensidad del sonido caiga desde un nivel de 60 dB (decibelios), por encima del umbral de audición, al umbral inaudible.

$$T_{60} = RT = \frac{0,16V}{S\alpha} (V)$$

Su fórmula contiene los diferentes parámetros:

- **T** es el tiempo,
- **V** el volumen de la sala en metros cúbicos,
- **S** es la superficie de las paredes
- **α** es el coeficiente de absorción de los materiales.

Esta ecuación permitía predecir el tiempo de reverberación en recintos cerrados, teniendo en cuenta que la cantidad de energía absorbida por una superficie depende del tamaño y del material de que este construida. Estas dos características se combinan en una cantidad denominada área de absorción efectiva, A_{ef} que se define como el producto de su área real por el coeficiente de absorción. El coeficiente de absorción de los materiales depende de la frecuencia, por lo que el tiempo de reverberación también.

La otra cantidad que afecta al decrecimiento del sonido es la rapidez con la que la energía sonora llega hasta las paredes antes de ser reflejada o absorbida. Esto depende de la intensidad del sonido ambiente, que a su vez depende del volumen de la sala V .

Al estudiar varias salas, juzgando si eran buenas acústicamente para su uso, Sabine determinó que las salas de conciertos buenas tenían tiempos de reverberación de 2 a 2.25 segundos, mientras que las buenas salas de conferencias tenían tiempos de reverberación ligeramente por debajo de 1 segundo.

La remodelación del Boston Symphony Hall, estaba previsto realizarlo como el auditorio de Leipzig y solamente querían aumentar el volumen. El aforo total debía de ser para 2500 personas y no contemplaban tocar las



Figura 6: Sala Boston Symphony Hall

superficies del recinto. Sabine les demostró que el aumento de volumen haría aumentar la reverberación y empeoraría la acústica del recinto. Añadió cambios en las superficies de las paredes para tener un tiempo óptimo y se convirtió en el primer auditorio realizado con una base científica.

Cuando llegó el momento de la inauguración, Sabine se llevó una gran decepción, ya que el tiempo de reverberación de la sala no se ajustaba al que el había predicho teóricamente. Fue muy criticado por los medios de comunicación y por otros expertos en la materia. Esto lo llevó a desistir en sus investigaciones y a recluirse en las aulas de clase como profesor. Sin embargo, la historia colocó a Sabine en el lugar que merecía. En 1950, cincuenta años después de la construcción del teatro, se realizaron algunas pruebas y se pudo contrastar que los cálculos de Sabine eran correctos. El tiempo de reverberación de la sala está en torno a los 1,9 segundos. De hecho, hoy en día, el Boston Symphony Hall está considerado, desde el punto de vista acústico, como una de las mejores salas del mundo.[8]

Se sabe que la ecuación de Sabine sobrestima el valor del tiempo de reverberación cuando la absorción es alta. Por ello varios investigadores, como Eyring y Millington, han tratado de mejorar la ecuación de Sabine sin modificar ampliamente la original, desarrollando en 1930 una ecuación para este caso.

$$T = \frac{0.16V}{-S \ln(1-\alpha)} \quad (VI)$$

Lo que se ha logrado es agregar algunas variantes como la temperatura y la humedad para hallar los factores de absorción. [7]

A partir de 1968, se han propuesto modelos informáticos de trazado de rayos que simulan las reflexiones del sonido en las superficies e intentan calcular a partir de ellas el tiempo de reverberación.

3.1. Medición in situ:

En el presente apartado se mostraran los métodos actuales para medir el tiempo de reverberación.

Uno de los parámetros más importantes a la hora de evaluar cómo decae la energía sonora en un recinto cerrado es el tiempo de reverberación. Dicho parámetro ha sido estudiado y analizado, desde Sabine que introdujo el concepto de reverberación cuantificándolo, a principios del siglo XX, pasando por Eyring, Millington, Fitzroy, Kuttruff, hasta Arau a comienzos del siglo XXI. Todos ellos realizaron medidas de tiempo de reverberación emitiendo con una fuente sonora en un determinado recinto y, en un instante dado, cesando la emisión de la fuente. Es entonces cuando el sonido decae en función de ciertos parámetros hasta que se llega al nivel de ruido propio del recinto en el que se realiza la medida.

Las primeras configuraciones que nos encontramos para realizar medidas de del tiempo de reverberación fueron en la década de los 80, estas configuraciones constaban de una fuente sonora de tamaño 0,5 cm x 0,24 cm, capaces de emitir potencias de 40 a 100 dB, excitada por un generador de ruido filtrado (banda ancha de 100 Hz a 10 KHz o 7 bandas de octava de 125 Hz a 8 KHz; pudiendo emitir ruido rosa y ruido blanco). Para la recepción del ruido se usaban sonómetros, a los que se le debía añadir diferentes juegos de filtros para poder medir en bandas de frecuencia, estos sonómetros captaban las caídas de señal y se imprimían en registradores de niveles portátiles. [9]

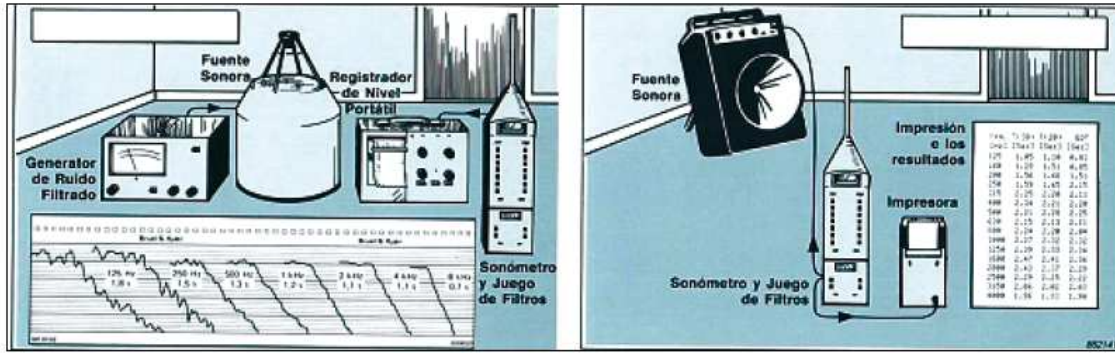


Figura 7: Sonómetros años 80 (Bruel&Kjaer)

Con posterioridad, se integraron a los propios sonómetros los juegos de filtros, como se puede ver a la derecha de la figura 7.

Otras configuraciones usadas fueron las que empleaban el conocido analizador acústico de edificios. Este equipo era capaz de interpretar las medidas procedentes del micrófono y presentaba en una pantalla LCD el resultado del tiempo de reverberación sin necesidad de plasmar en una gráfica la caída de la señal.

Sin embargo si se quería obtener el tiempo de reverberación gráficamente, se podía obtener conectando el analizador al registrador de nivel, que mediante una plumilla iba dibujando la caída de la señal sobre un papel calibrado. Era sobre ese papel donde se realizaba el cálculo de la caída de señal ponderando, cuánto tiempo había transcurrido en caer 60 dB (o 30 dB si la caída era lineal o el margen dinámico no era adecuado). La emisión de ruido a la sala a medir se realizaba con una fuente sonora auto amplificada, constituida por un generador de ruido, un amplificador de potencia y un altavoz (capaz de emitir una potencia de 118 dB en un margen frecuencial de 100 hz a 4 KHz). Todo ello se puede observar en las figuras 7 y 8.

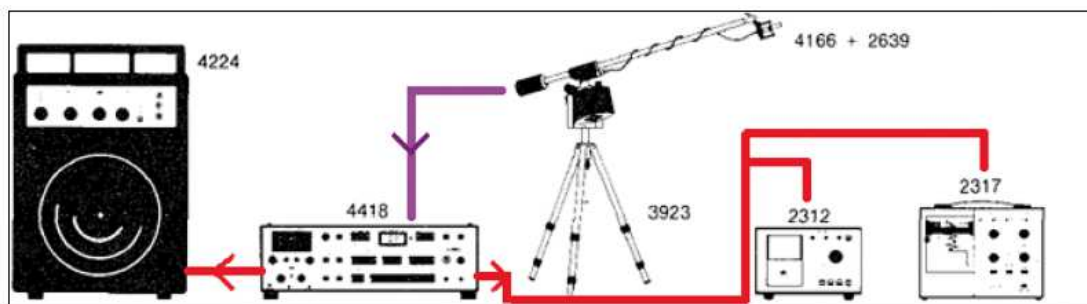


Figura 8: fuente sonora autoamplificada, constituida por un generador de ruido, un amplificador de potencia y un altavoz. (Bruel&Kjaer)

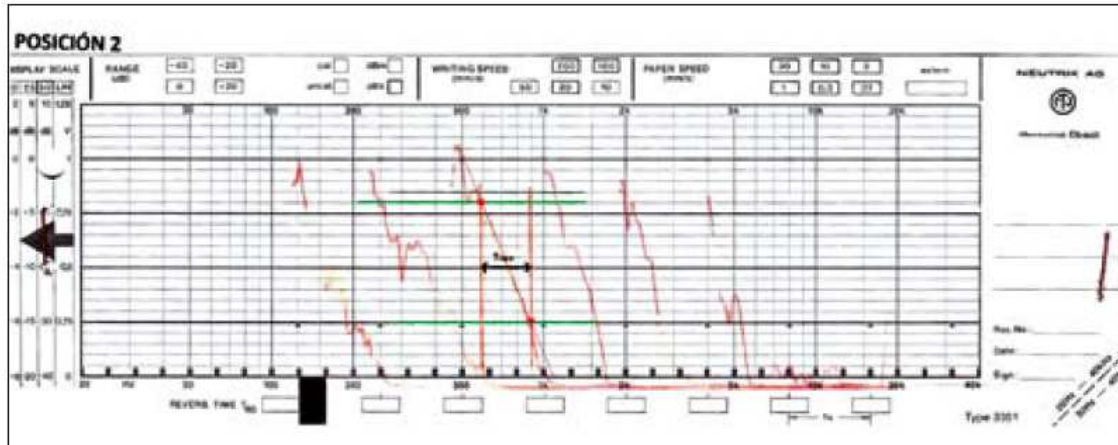


Figura 9: caída de la señal sobre papel calibrado (Brüel&Kjaer)

Los sistemas de medida que nos encontramos hoy en día para la medida del tiempo de reverberación van de los sistemas de adquisición de datos en tiempo real a los equipos totalmente portátiles que interactúan con los ordenadores para el procesamiento de datos y creación de informes.

Los sistemas de adquisición de datos en tiempo real consisten en un hardware al que le llegan los datos procedentes de uno (o varios) micrófonos, conectado a un ordenador portátil donde se encuentran instalados diferentes módulos de software, para calcular, analizar y procesar los tiempos de reverberación medidos (entre otros parámetros). La señal llega al equipo en tiempo real y se visualiza en la pantalla del ordenador, como se observa en la figura 10. [9]



Figura 10: micrófono conectado a un ordenador (Fuente: Álava ingenieros)

Los equipos portátiles que interactúan con los ordenadores para el procesamiento de datos y creación de informes, consisten en equipos que integran un micrófono de medida que capta los datos y los integra en el software del propio equipo capaz de mostrar en la pantalla los resultados de las medidas.



Figura 11: sonómetro micrófono

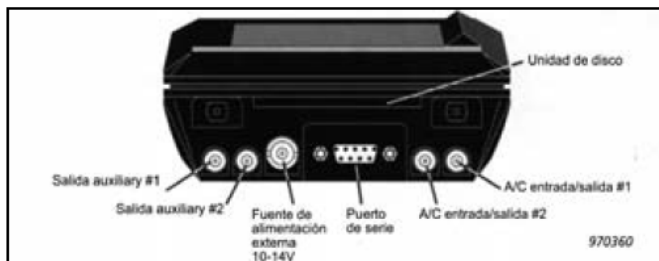


Figura 12: amplificador de potencia

Igualmente interactúan con un ordenador para el volcado y tratamiento de los datos. [10]

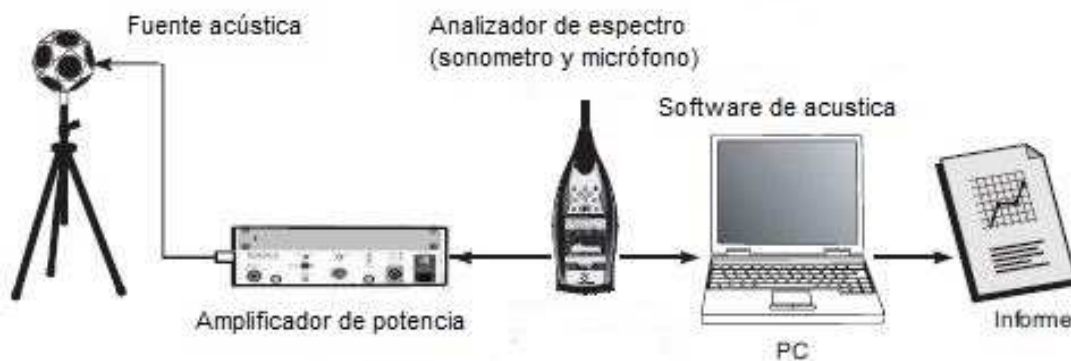


Figura 13: esquema de adquisición de datos del tiempo de reverberación mediante equipos portátiles

Como se ha podido ver hasta ahora las necesidades de portabilidad a la hora de realizar medidas de tiempo de reverberación, y de cualquier otro tipo, así como la versatilidad a la hora de comunicar los diferentes equipos y la mejora en el tratamiento de los datos, han hecho evolucionar los equipos de laboratorio hacia estos últimos que hemos comentado.

En la actualidad, el uso de dispositivos móviles es un hábito muy cotidiano y en pleno auge. Existen varias aplicaciones para android, para calcular el tiempo de reverberación en cualquier lugar y de forma gratuita.

4. OBJETIVOS:

4.1. Objetivos generales:

Deberemos comprobar la precisión de las aplicaciones que miden el tiempo de reverberación. El objetivo general de este proyecto consiste en demostrar la fiabilidad o no de los resultados del tiempo de reverberación, calculados en segundos, mediante una aplicación para Smartphone con sistema operativo Android.

4.2. Objetivos específicos:

Los objetivos específicos que debemos desarrollar para analizar la fiabilidad de la aplicación móvil, midiendo el tiempo de reverberación, serán los siguientes:

- Elegir la aplicación más fiable de todas las que hay disponibles, para usar la aplicación considerada mejor para realizar el análisis. Para la elección de la aplicación deberemos comparar su precisión al dar los resultados, es decir si nos da un resultado estimado, o nos da el cálculo en octavas o en tercios de octavas. También compararemos su coste y valoración por los usuarios.
- Elegir el sistema operativo móvil más representativo.
- Obtener el tiempo de reverberación de un aula de la escuela con material absorbente y sin material absorbente, mediante este método y otros como Sabine y el ensayo realizado in situ.
- Concluir sobre la fiabilidad de la aplicación, realizando una comparación de los resultados obtenidos en los ensayos realizados in situ mediante sonómetro y fuente acústica y los resultados obtenidos in situ mediante la aplicación con distintos móviles.
- Aportar una visión detallada de la diferencia de usar los métodos convencionales in situ, mediante instrumentos profesionales para medir el tiempo de reverberación, los métodos de estimación mediante fórmula de Sabine y los métodos realizados mediante la aplicación móvil, para Smartphone con sistema operativo Android, para medir el tiempo de reverberación.

5. METODOLOGÍA:

5.1. Razones por las que medir el tiempo de reverberación in situ

Existen varias razones para medir el tiempo de reverberación:

En primer lugar, se debe medir el tiempo de reverberación debido a razones normativas, ya que en España, los códigos de la edificación especifican determinados valores del tiempo de reverberación requerido en aulas u otras categorías de recintos.

En algunos países, como en España los códigos de la edificación especifican los tiempos de reverberación requeridos en aulas u otras categorías de recintos. Sin embargo, corresponde al equipo de diseño especificar y diseñar un tiempo de reverberación adaptado al uso del recinto, estudiando que materiales usar en su construcción (absorbentes o difusores) para poder satisfacer el mejor tiempo de reverberación para el uso al que se destine el recinto sin poder pasarse de los límites establecidos por las normas; es decir las normas imponen los límites pero es función del equipo de diseño estudiar qué tiempo de reverberación es más adecuado para el uso al que se destine el recinto.

En segundo lugar, debido a razones de calidad acústica ya que el nivel de presión acústica de las fuentes sonoras, la inteligibilidad de la palabra, y la percepción de la privacidad en un recinto dependen mucho de tiempo de reverberación.

Y en tercer lugar, el tiempo de reverberación se mide como apoyo a otro tipo de mediciones, para determinar el término de corrección de la absorción del recinto inherente en múltiples mediciones acústicas, tales como las mediciones del aislamiento acústico y las mediciones de la potencia acústica.

El tiempo de reverberación es lo que principalmente caracteriza un local. Sin informarnos de la totalidad de la calidad y parámetros de la sala y de cómo va a sonar. Nos puede proporcionar una idea de los posibles problemas y decadencias.

Es decir como se ha visto en las dos últimas razones para calcular el tiempo de reverberación es importante calcularlo como apoyo a otros cálculos para evaluar la acústica de salas:

5.2. Smartphone y sistema operativo elegido para el estudio:

Según un estudio de enero del 2016 de Antevenio [12] es la época dorada del móvil, el Smartphone se ha convertido en el dispositivo de conexión a Internet favorito para 9 de cada 10 consumidores, lo utilizamos 24 horas al día, en cualquier momento y lugar, y son muchos los que reconocen que lo suyo con el móvil casi podría designarse como adicción. No es de extrañar, por lo tanto, que aparejado a este aumento constante del uso del móvil vaya aparejado un aumento del uso de las apps.

Aún así, llama la atención al buen ritmo al que crecieron las apps durante el último año. Así, en 2015, el uso de las apps (midiendo dicho uso por aperturas de sesión de las aplicaciones) dobló al del 2014, según [17] en concreto el ratio de crecimiento fue del 58%.

Además, creció el uso de todo tipo de apps (a excepción de los juegos, que experimentaron un ligerísimo retroceso del 1%) lo que quiere decir que cada vez usamos mayor diversidad de aplicaciones. Liderando el crecimiento, están las apps de personalización, cuyo uso aumentó un 332% en 2015. También crecieron considerablemente las aplicaciones de noticias y revistas (135%), productividad (125%) y shopping (81%).

Es cierto que el crecimiento global del uso de las apps ya se está ralentizando (fue del 58% en 2015, pero del 76% en 2014 y del 103% en 2013) a medida que el uso de smartphones llega a un punto de saturación, pues prácticamente ya todos los adultos cuentan con un móvil. Por eso lo más interesante de las cifras del 2015 es que la mayor parte de ese crecimiento provino de usuarios ya existentes y no nuevos (40% frente al 18%), un porcentaje muy superior al de 2014 (20%) y 2013 (10%). Resulta evidente que estas cifras reflejan una situación en la que los usuarios de móvil pasan cada vez más tiempo pegados a sus pantallas.

Para realizar este estudio tenemos que tener en cuenta el sistema operativo de los teléfonos móviles.[12]

Según un estudio del año 2015 de distrendia [13], Android es el sistema operativo que domina el mercado, con 3 de cada 4 personas, pero bajando ligeramente frente al año anterior. Le sigue de lejos Apple, que sin embargo ganó cuota de mercado el año pasado alcanzando casi el 20%.

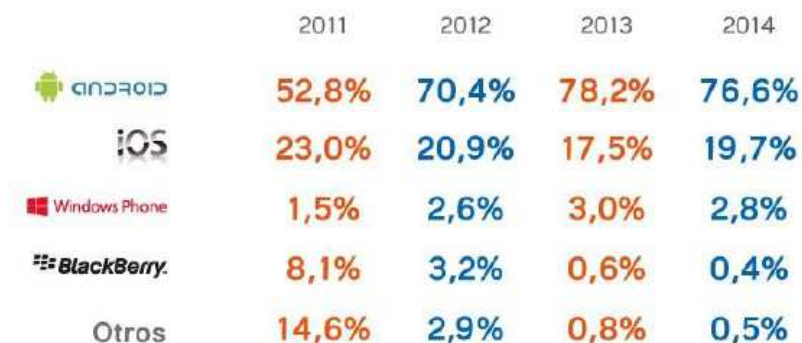


Figura 14: Cuota de penetración de los sistemas operativos en smartphones en el mundo (grafico elaborado por distrendia a partir de datos de IDC)

También en España el sistema operativo más utilizado es Android, seguido de lejos por iOS. Si vemos la evolución, el sistema de Google sigue ganando cuota de mercado y Apple incrementa algo su cuota respecto al año anterior (pero con una cuota ligeramente inferior a la que tiene a nivel mundial).

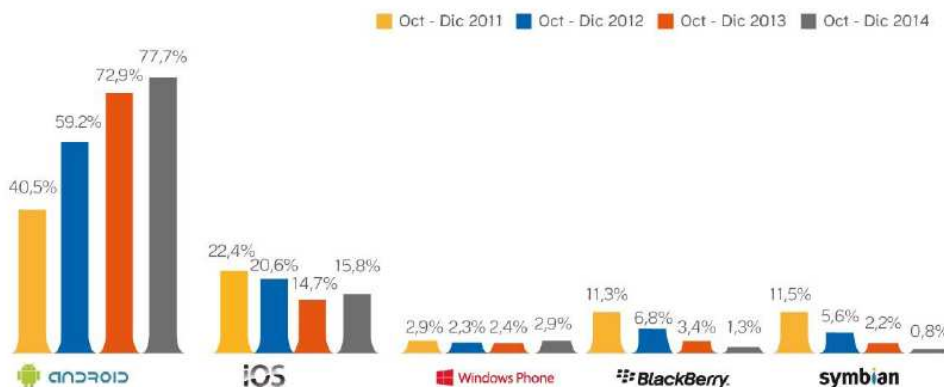


Figura 15: Evolución de la cuota de penetración de los sistemas operativos en smartphones en España. (Gráfico elaborado por distrendia a partir de datos de AIMC)

Blackberry y Symbian van reduciendo progresivamente su participación. Hace sólo tres años, 1 de cada 5 españoles contaba con uno de estos dos sistemas operativos. Hoy apenas alcanzan el 2% entre ambos.

Las aplicaciones móviles han crecido exponencialmente en los últimos años, tanto en oferta por parte de las tiendas online como en descargas por parte de

los usuarios. Los sistemas de Google Play e iOS juntos contaban en 2015 con más de 2,5 millones de aplicaciones, mientras que hace tres años, apenas existían 300 mil aplicaciones en el mercado de smartphones.

Actualmente cada mes se lanzan 40.000 nuevas aplicaciones al mercado del móvil, los sistemas Google Play Store y Apple Store ofrecieron en 2015 más de 2,5 millones de apps a los usuarios, mientras que hace tres años, apenas existían 300 mil aplicaciones en el mercado de smartphones.

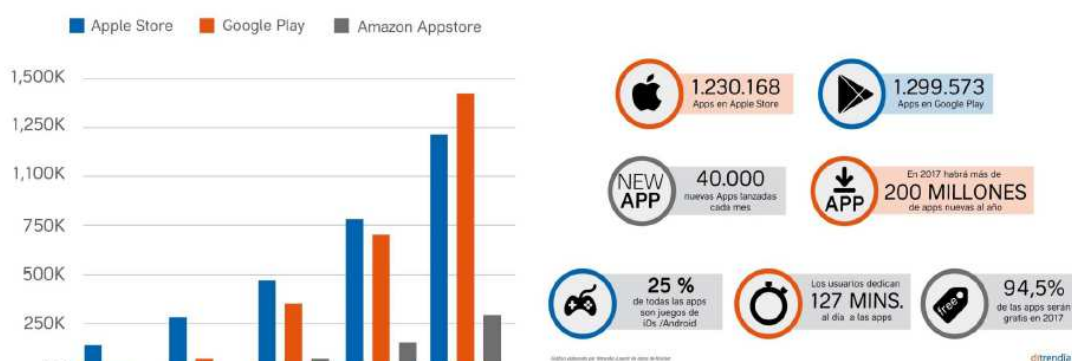


Figura 16: gráfico del número total de apps por tienda (gráfico elaborado por distrendia a partir de datos de appfigures)

Por todo ello, se ha decidido realizar el estudio con smartphones que tengan el sistema operativo Android, ya que como se vio anteriormente según el estudio de distrendia [13], este sistema es el más usado actualmente y el que lanza más nuevas aplicaciones al mercado.

Teléfonos Móviles usados en los ensayos:

MARCA MOVIL	VERSION ANDROID
AQUARIS M5 (BQ)	5.1.1.
AQUARIS E5 (BQ)	4.4.4.
GTI 9300 (SAMSUNG)	4.3.
ASCEND Y300 (HUAWEI)	4.1.
NOTE 3 (SAMSUNG)	5.0.

5.2.1. Características Smartphone:

En un sonómetro profesional el elemento más determinante de toda la circuitería es el micrófono. En Smartphones, que se producen por millones, se sacrifica precisión y capacidad de respuesta a favor de una solución integrada y barata. Aquí se suelen emplear micrófonos de tipo MEMS (pequeños sistemas microelectrónicos), con costes por unidad bajos y calidad suficiente para un uso doméstico y especialmente pensado en la captación de voz, pero que por concepto no llegan a las exigencias de un micrófono profesional.

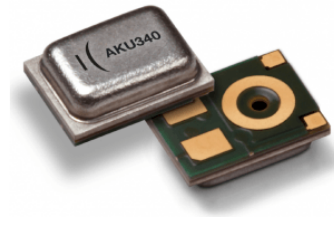


Figura 17: Micrófonos MEMS

Aunque hay muchas diferencias entre ambos tipos de micrófono, comparemos un par de parámetros objetivos como ejemplo:

- **Linealidad de la respuesta en frecuencia** (error ± 2 dB con incidencia frontal): un micrófono de sonómetro Tipo 1 suele tener una respuesta plana en todo el rango de audio (típicamente desde 5 Hz). En cambio, el ancho de banda útil de un micrófono MEMS normalmente parte desde unos 50 Hz lo que no cubriría todo el espectro de audición humana. Por lo tanto, al medir sonido con un Smartphone estaríamos filtrando las frecuencias más bajas y distorsionando el resultado.
- **Ruido inherente o Minimum Equivalent Input-Noise (EIN):** En un micrófono Tipo 1 este valor suele estar por debajo de los 15 dBA, mientras que los MEMS de mayor calidad (los de mayor relación señal/ruido) está en torno a los 30 dBA. Teóricamente no podemos medir niveles sonoros cercanos o inferiores al ruido inherente. [18]

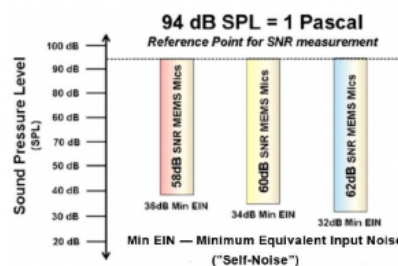


Figura 18: Minimum Equivalent input-Noise

5.3. Aplicaciones que miden el tiempo de reverberación:

5.3.1. Tiempo de reverberación:

Con esta aplicación puedes medir el tiempo de reverberación y se puede ver gráficamente de qué forma se extingue la energía del sonido con el tiempo, generando un ruido impulsivo como puede ser una palmada fuerte o un globo explotándose.



Figura 19: icono aplicación tiempo de reverberación

Esta aplicación por lo tanto permite:

- Visualizar la evolución de la energía sonora.
- Visualizar el periodo de análisis.
- Indicador de medida saturada (clipping). En este caso se recomienda alejar el micrófono de la fuente de ruido impulsivo.
- Indicador de la relación señal-ruido. Para un mejor rendimiento se recomienda generar una señal de prueba impulsiva de gran intensidad.



Figura 20: imagen de la aplicación tiempo de reverberación en funcionamiento

Esta aplicación cuenta con más de 5000 descargas y está valorada con una calidad media ya que tiene una valoración de 2,6 puntos sobre 5.

Se decide prescindir de esta aplicación ya que hay otras más precisas, dándonos el resultado en bandas de octava, además de que no está actualizada a las últimas versiones de Android.

Existe la versión pro que cuesta 1,20€ que si analiza en bandas de octava (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz) pero sigue teniendo el mismo problema que la versión anterior al no estar actualizada.

5.3.2. Nachhallzeit:

Con esta aplicación se puede medir el tiempo de reverberación de una habitación.

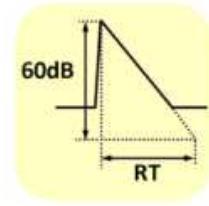


Figura 21: icono de la aplicación Nachhallzeit

Antes y durante la medición, debe haber silencio en la habitación. La medición se desencadena por un aplauso fuerte o la explosión de una bolsa de papel. El valor determinado del tiempo de reverberación se muestra inmediatamente, aparece un círculo verde indicando que ha sido una evaluación estadística de éxito.

Esta aplicación cuenta con menos descargas que la anterior ya que solo tiene 500 descargas pero está valorada con una calidad superior ya que tiene una valoración de 4,4 puntos sobre 5, hay que tener en cuenta que esta valoración no es muy representativa ya que esta aplicación cuenta con 10 valoraciones sin embargo las otras dos contaban con 80 valoraciones la aplicación tiempo de reverberación y 48 la aplicación TR.

Se decide prescindir también de esta aplicación ya que la anterior es más precisa y al igual que la primera esta tampoco nos da el resultado en bandas de octava además de que esta aplicación tiene un coste de 1,99€.

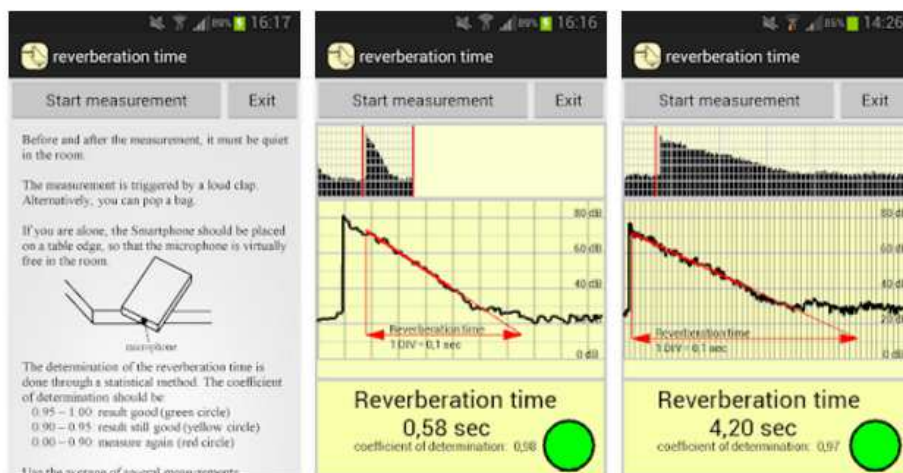


Figura 22: imagen de la aplicación nachhallzeit en ejecución.

5.3.3. RT:

Es una aplicación con la que puedes determinar un promedio del tiempo de reverberación o por bandas de octavas de un modo sencillo y gratuito; sin necesidad de tener que calibrar.



Figura 23: Icono de la aplicación RT

Su funcionamiento es muy sencillo; primero debemos apretar **START**, después damos una palmada o generamos un ruido y para terminar apretamos **STOP**. Damos “SÍ” si la medida ha sido correcta.

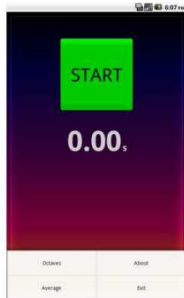


Figura 25: pantalla principal de la aplicación RT.

Se pueden obtener dos tipos de resultados el tiempo de reverberación medio como se puede ver en la figura 22, y el tiempo de reverberación en tercios de octava como se puede ver en la figura 23.



Figura 24: Pantalla de resultados del tiempo de reverberación en bandas de octavas de la aplicación TR

Para conseguir unos resultados óptimos, es más que recomendable tratar de situar el dispositivo lejos de superficies reflectantes y pegar la palmada a mayor distancia del radio crítico, para que el sonido reverberado sea mayor que el directo.

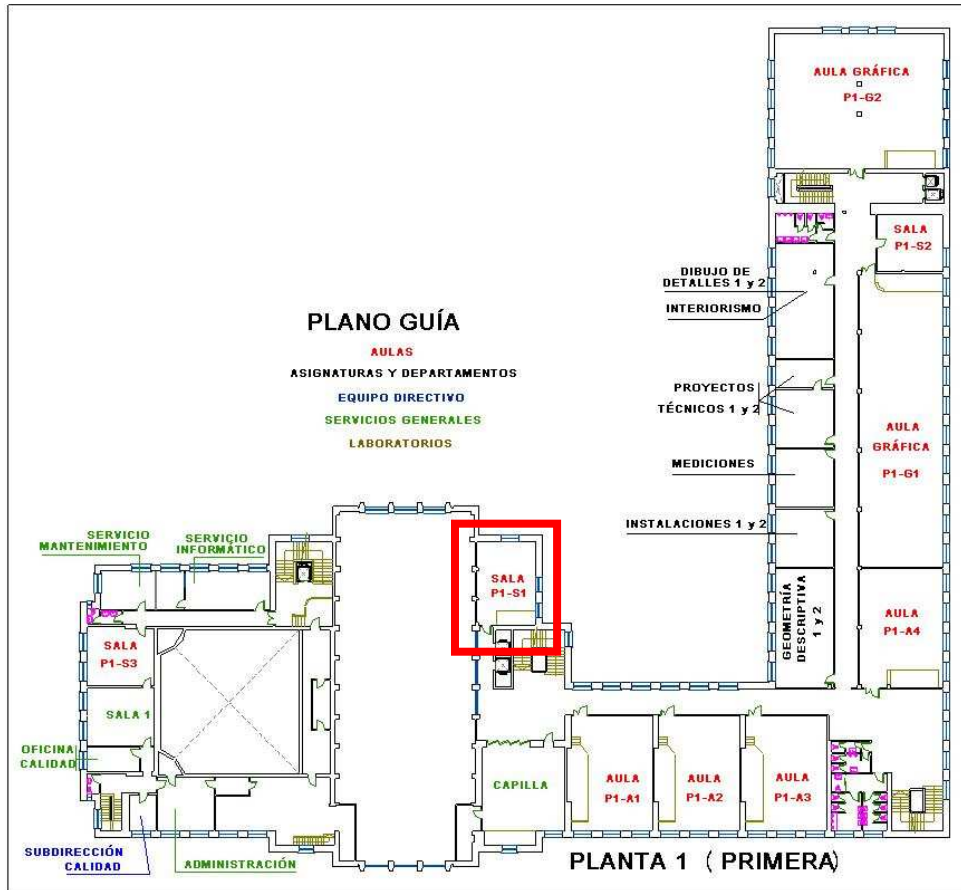
Si el tiempo de medida ha sido demasiado corto, aparecerá un mensaje en la pantalla indicándolo.

Esta aplicación cuenta con más de 5000 descargas y está valorada con una calidad superior a la aplicación primera ya que tiene una valoración de 3,9 puntos sobre 5.

Se decide estudiar esta aplicación ya que se considera la más precisa ya que nos da el resultado tanto en tiempo de reverberación promedio como en tercios de octavas y es gratuita.

5.4. Características del recinto de ensayo:

El recinto elegido para los ensayos, es el aula B del edificio de la Escuela Técnica Superior de Edificación (ETSEM).



El aula está formada por dos muros de fachada contruïdos mediante 80 mm de chapado de piedra caliza, 180mm de fábrica de ladrillo macizo tosco 300 mm, cámara de aire y 180mm de trasdosado cerámico, terminado con un enlucido de 15 mm.

Y los tabiques están realizados mediante tabicón y terminación de enlucido de yeso de 15 mm en ambas caras.

Se puede ver los plano del aula en el anexo.

Acabado realizados mediante suelo con moqueta sin características absorbentes definidas y falso techo mediante placas de yeso laminado sin material absorbente acústico.

5.5. Ensayo convencional in situ:

En muchos recintos, el número de personas presentes puede influir mucho en el tiempo de reverberación, las mediciones del tiempo de reverberación se deberían realizar en un recinto sin personas sin embargo, a la hora de realizar nuestra medición nos encontrábamos dos personas ya según la norma UNE-EN-ISO-3382-2 se puede permitir que un recinto con hasta dos personas presentes represente su estado vacío, salvo que se especifique lo contrario.

Como nuestro resultado de la medición se utiliza para la comparación de un nivel de presión acústica medido por distintos métodos, el número de personas presentes en el recinto fue el mismo en todas las mediciones.

La atenuación por el aire puede contribuir de manera significativa a la absorción acústica a frecuencias elevadas por ello para las mediciones de precisión, se debe medir la temperatura y la humedad relativa del aire en el recinto:

Temperatura del aire en el recinto: 18,6°C

Humedad relativa del aire en el recinto: 30%

5.5.1. Equipo necesario para realizar la medición:

a) Fuente acústica, en nuestro caso usaremos fuente sonora CESVA FP 122:

La fuente debería ser lo más omnidireccional posible. Para mediciones de precisión, como es nuestro caso, la directividad de la fuente acústica debe cumplir los requisitos de la Norma ISO 3382-1, apartado A.3.1. Debe producir un nivel de presión acústica suficiente para generar curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.



Figura 26: Fuente sonora CESVA FP122

b) Micrófonos y equipo de análisis, ANALIZADOR CLASE 1 (CESVA SC310):

Se deben utilizar micrófonos omnidireccionales para detectar la presión acústica y la salida se puede conectar:

- directamente a un amplificador, un conjunto de filtros y un sistema donde se muestran las curvas de decrecimiento o a un equipo de análisis que permita calcular las respuestas impulsivas
- o a un registrador de señal para un análisis posterior.



Figura 27: CESVA SC310

c) Micrófono y filtros:

El micrófono debería ser lo más pequeño posible y tener preferiblemente un diámetro de diafragma máximo de 14 mm. Se permiten micrófonos con diámetros de hasta 27 mm si son del tipo respuesta en presión o del tipo respuesta en campo libre, siempre y cuando se suministren con un corrector de incidencia aleatoria. Los filtros de banda de octava o de un tercio de octava deben cumplir la Norma IEC 61260.

d) Ordenador con equipo de procesamiento de la señal y conformación del registro de decrecimiento del nivel sonoro:

El equipo para conformar (y mostrar y/o evaluar) el registro de decrecimiento debe utilizar alguno de los siguientes elementos:

- I. promediado exponencial, con curva continua como salida;
- II. promediado exponencial, con puntos de muestreo discretos sucesivos, a partir del promedio continuo como salida;
- III. promediado lineal, con promedios lineales discretos sucesivos como salida.

e) Sobresaturación: No se debe admitir ninguna sobresaturación en ninguna fase del equipo de medición. Cuando se utilizan fuentes acústicas impulsivas, se deben utilizar dispositivos indicadores de niveles de pico para detectar las sobresaturaciones.

5.5.2. Posiciones de medición:

En la tabla 1 se indican los números mínimos de posiciones de medición para obtener una cobertura adecuada en un recinto, en nuestro caso usaremos el método de ingeniería, distribuiremos el micrófono en tres puntos y la fuente en dos.

Tabla 2. Números mínimos de posiciones de medición			
	Control	Ingeniería ^a	Precisión
Combinaciones fuente-micrófono	2	6	12
Posiciones de la fuente ^b	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posiciones de micrófono ^c	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido)	1	2	3
a Cuando el resultado se utiliza para un término de corrección en otras mediciones del nivel de ingeniería, solo se requiere una posición de la fuente y tres posiciones de micrófono.			
b Para el método del ruido interrumpido, se pueden utilizar simultáneamente fuentes no correlativas.			
c Para el método del ruido interrumpido y cuando el resultado se utiliza para un término de corrección, se puede utilizar una percha de micrófono rotativo en lugar de múltiples posiciones de micrófono.			

Las posiciones de la fuente pueden ser las posiciones normales en función del uso del recinto. Las posiciones de micrófono deben estar preferiblemente separadas al menos una distancia mínima de 2 m para el rango de frecuencias habitual. La distancia desde cualquier posición de micrófono a la superficie reflectante más cercana, incluyendo el suelo, debería ser preferiblemente al menos un cuarto de longitud de onda, es decir, generalmente en torno a 1 m. Se deberían evitar las posiciones simétricas.

Las posiciones de micrófono no deben estar muy próximas. De lo contrario, el número de posiciones independientes es inferior al número real de posiciones de medición. Los números mínimos indicados en la tabla 1 son los números de posiciones independientes.

Ninguna posición de micrófono debe estar muy próxima a la posición de la fuente, para evitar una influencia demasiado fuerte del sonido directo.

Método de ingeniería: El método de ingeniería es adecuado para la verificación del comportamiento de los edificios con respecto a las

especificaciones del tiempo de reverberación o de la absorción del recinto. Se debería utilizar para las mediciones de la Norma ISO 140 (todas las partes) con menciones a las mediciones del tiempo de reverberación. La precisión nominal se supone superior al 5% en bandas de octava y superior al 10% en bandas de un tercio de octava, véase el anexo A.

Se realizan mediciones del tiempo de reverberación para al menos dos posiciones de la fuente. Se requieren al menos seis combinaciones de fuente-micrófono independientes [5].

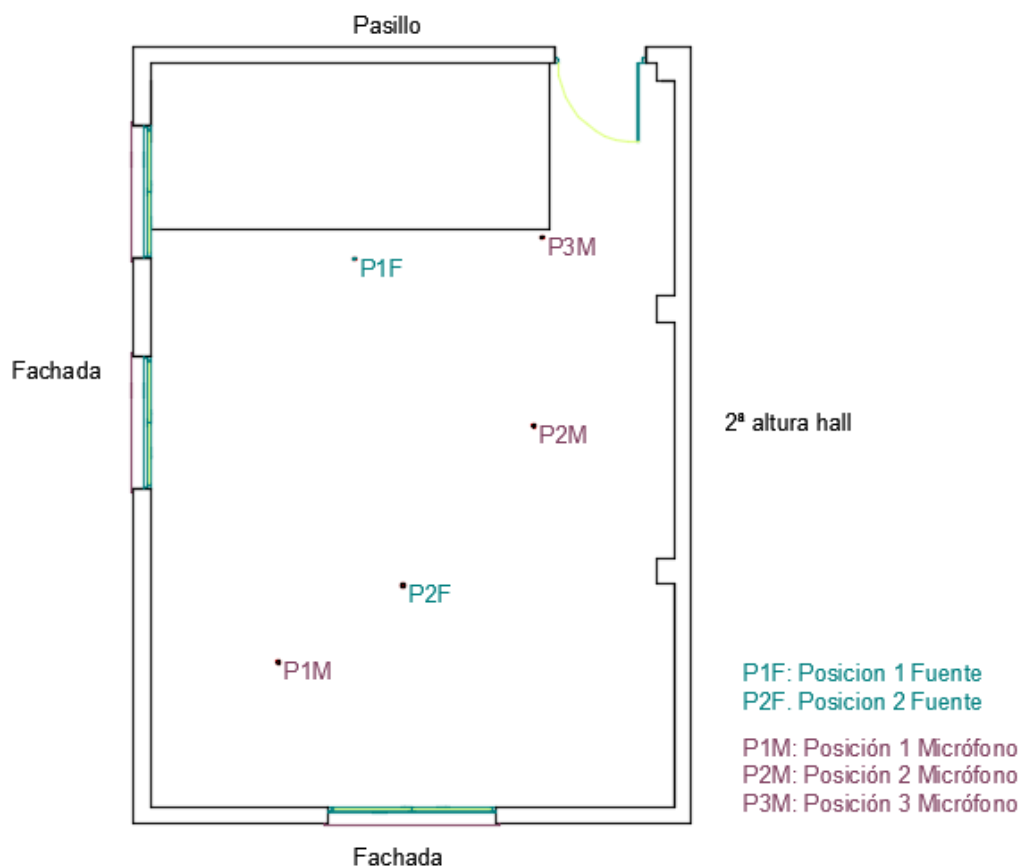


Figura 28: esquema posiciones de la fuente y micrófono.

5.6. Estimación del tiempo de reverberación mediante formula de Sabine:

Debido a que el método de cálculo del tiempo de reverberación realizada con los dispositivos móviles es una estimación lo compararemos también con las estimaciones calculadas mediante el método de Sabine ya que es el método usado por el CTE DB-HR y es una de las fórmulas de estimación del tiempo de reverberación más usadas y más simples.

Formula de Sabine:

$$Tr = \frac{0,16V}{A}$$

$$A = \Sigma \alpha_m \cdot S + \Sigma AOm + 4mV$$

Siendo:

- Tr= Tiempo de reverberación (s)
- V= volumen del recinto (m³)
- A= Absorción acústica equivalente del recinto (m²)
- α_m = Coeficiente de absorción acústica medido de cada parámetro, para las bandas de tercios de octava de 500, 1000 y 2000 Hz
- S= Superficie de cada parámetro (m²)
- Aom= Área de absorción de cada mueble y/o persona (m²)
- A= coeficiente de absorción acústica medio del aire, para las bandas de tercio de octava de 500,1000 y 2000Hz

Como en el ensayo in situ realizaremos la estimación con material absorbente y sin él.

5.7. Ensayo con smartphones

5.7.1. Equipo necesario para realizar la medición:

- a) Fuente sonora CESVA FP 122, usamos la misma fuente sonora que la usada en la medición in situ.
- b) Teléfonos móviles



Figura 29: Fuente sonora CESVA FP122

5.7.2. Posición de los equipos

Como nos recomiendan en las condiciones de uso de la aplicación que para conseguir unos resultados óptimos debemos tratar de situar el dispositivo lejos de superficies reflectantes disponemos los dispositivos en el centro del aula como se puede observar en la figura 30 y dispuestos a una altura de 1m sobresaliendo el micrófono hacia afuera.

A diferencia de los sonómetros, según se aprecia en las condiciones de uso de la aplicación, esta no se calibra.

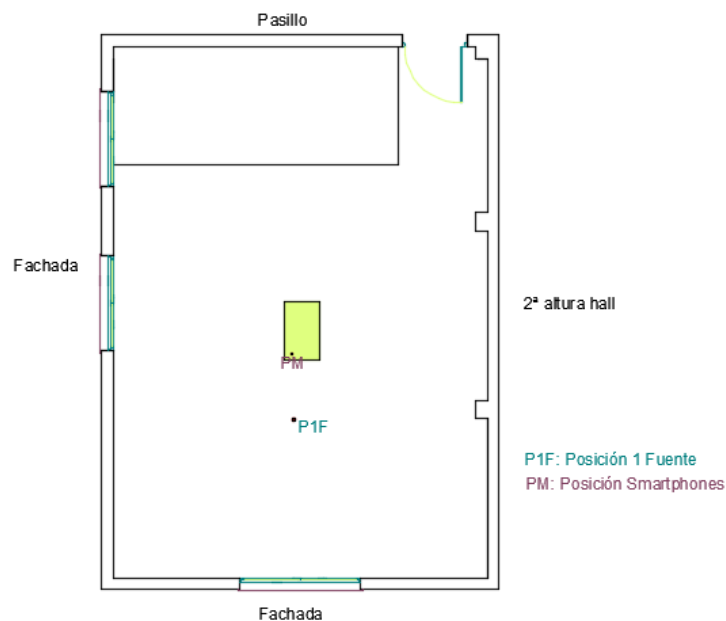


Figura 30: esquema posición fuente y smartphones

6. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSION

El nivel de reverberación depende del volumen del recinto y de los materiales utilizados en las superficies estudiadas, disminuyendo el tiempo de reverberación cuanto más absorbentes sean dichas superficies, por ello en este proyecto se van a considerar dos tipos de ensayos uno con la inclusión de material absorbentes y otro sin ellos.

6.1. Ensayos sin absorbentes:

6.1.1. Ensayo mediante aplicación móvil:

Los resultados obtenidos en el ensayo, sin absorbentes añadidos, del tiempo de reverberación del aula B, mediante la aplicación RT con los distintos móviles se especifica en la siguiente tabla:

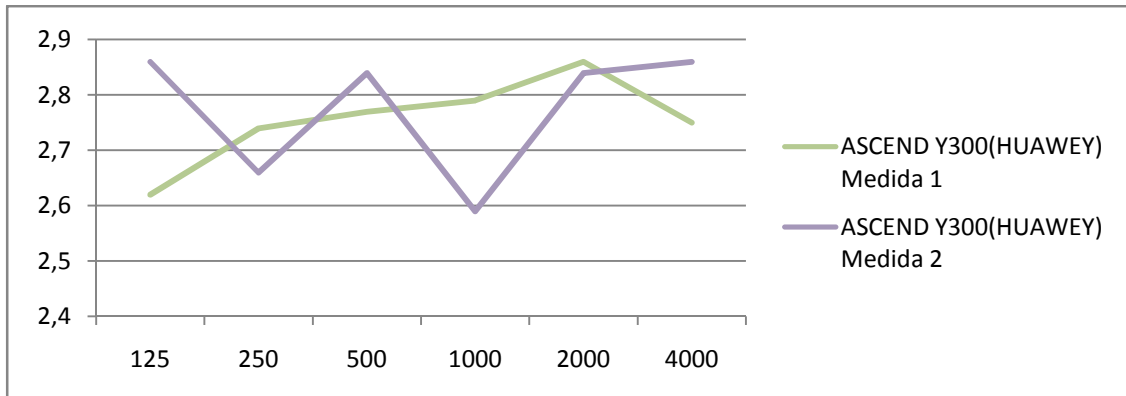
Tabla 3. Resultados ensayo mediante aplicación										
SIN ABSORBENTE										
Hz	AQUARIS E5 (BQ)		AQUARIS M5 (BQ)		GTI 9300 (SAMSUNG)		Ascend Y300 (Huawey)		NOTE 3 (SAMSUNG)	
	medida 1	medida 2	medida 1	medida 2	medida 1	medida 2	medida 1	medida 2	medida 1	medida 2
125	2,91	4,91	1,72	2,11	1,72	2,4	2,62	2,86	2,77	1,88
250	3,07	5,27	1,89	2,04	1,83	2,33	2,74	2,66	2,42	1,73
500	2,37	4,86	1,9	1,64	1,92	2,28	2,77	2,84	2,65	2,17
1000	2,52	4,27	1,78	1,65	1,82	2,19	2,79	2,59	2,24	2,24
2000	2,41	4,4	1,99	1,6	1,95	2,16	2,86	2,84	2,29	1,78
4000	1,89	4,58	1,78	1,79	2,09	2,1	2,75	2,86	2,11	1,75

En la tabla anterior se observan todos los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos según el tipo de móvil usado y la frecuencia, en bandas de octavas, debido a que esta aplicación nos da los resultados con esta precisión.

Tenemos que destacar que la normativa de acústica para construcción sólo contempla el uso de frecuencias entre 100 y 3150 Hz, por lo tanto esta aplicación cumple con este criterio.

Si compramos los resultados de los dos ensayos llevados a cabo con cada móvil se puede observar que realizando dos ensayos con las mismas características y con el mismo móvil nos dan resultados muy diferentes.

- Los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados con el móvil Ascend Y300 (Huawei) como se ve en la grafica 1 son muy diferentes:

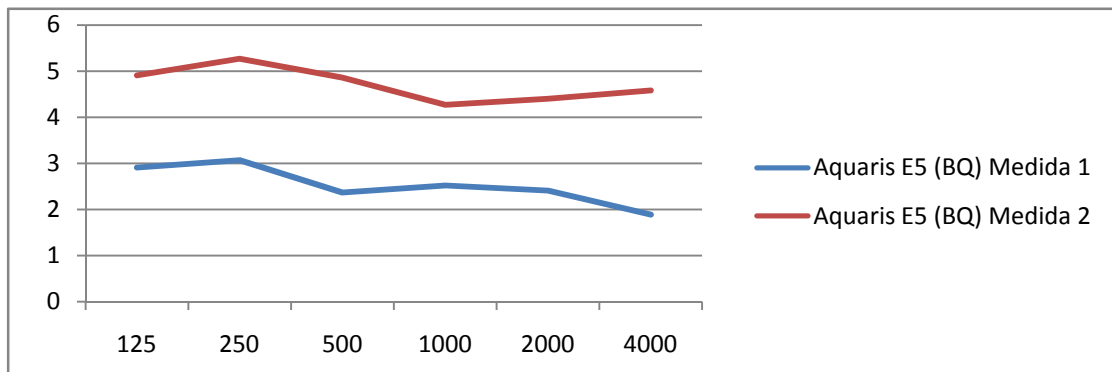


Gráfica 1: Ensayos sin absorbente con móvil Ascend Y300 (Huawei)

La primera medición nos da una gráfica algo más constante, a medida que suben las frecuencias el tiempo de reverberación crece, a excepción de las altas frecuencias entre 2000 y 4000 Hz que el tiempo de reverberación baja.

Sin embargo la segunda medición nos da resultados totalmente contrarios a la primera, ya que no es constante tiene subidas y bajadas de tiempos de reverberación. En las frecuencias de 125 Hz y 500 Hz obtenemos tiempos de reverberación altos y en frecuencias de 250 Hz y 1000 Hz baja el tiempo de reverberación y vuelve a subir el tiempo de reverberación en frecuencias entre 2000 y 4000Hz.

Pero hay que tener en cuenta que los resultados de las dos mediciones se encuentran dentro de un mismo rango muy reducido de resultados, en torno a 2,9 segundos y 2,6 segundos.

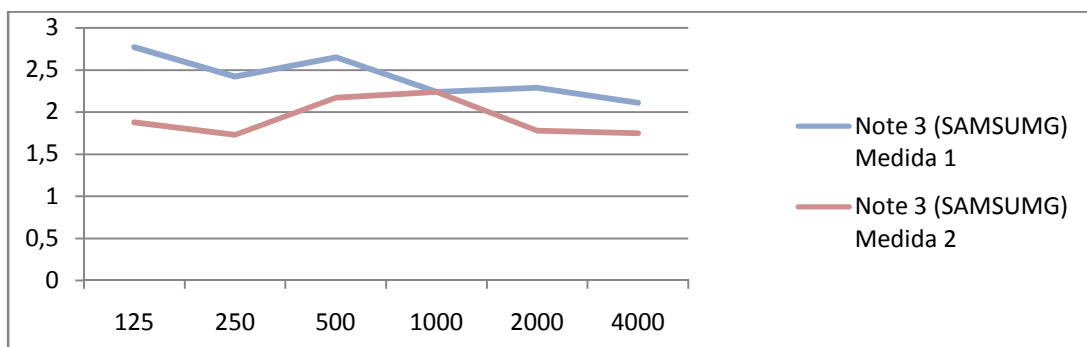


Gráfica 2: Ensayos sin absorbente con móvil Aquaris E5 (BQ)

Los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados con el móvil Aquaris E5 (BQ) como se ve en la grafica 2 se encuentran en un rango mayor:

La primera medición realizada con este móvil nos da una gráfica constante entre 5,5 segundos y 4 segundos, pero se podría considerar nula, ya que como se puede observar en la gráfica 6, los valores obtenidos son muy altos en comparación con los obtenidos mediante el resto de las mediciones.

La segunda medición nos da una gráfica bastante constante pero con tiempos de reverberación mucho más bajos entorno a 3 segundos y 2 segundos, aunque son valores muy altos se pueden considerar probables.

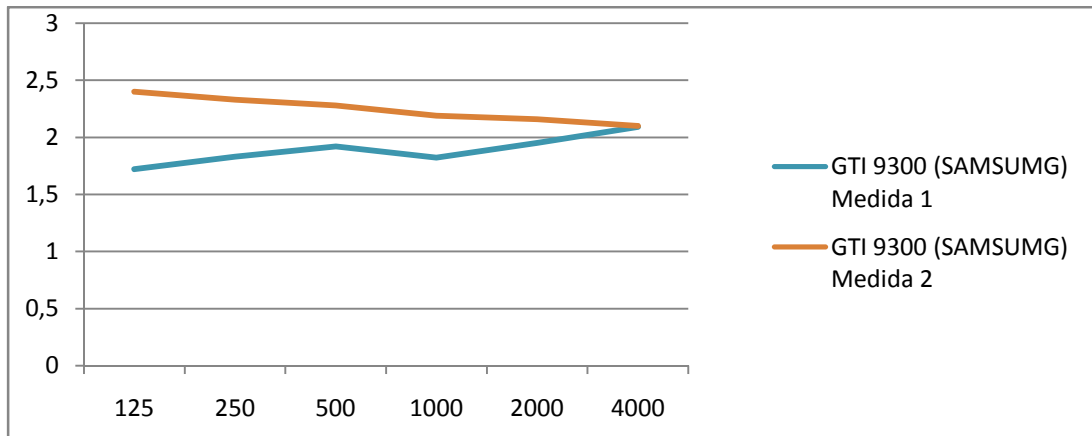


Gráfica 3: Ensayos sin absorbente con móvil Note 3 (Samsung)

Los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados con el móvil Note 3 (Samsung) como se ve en la grafica 3 se encuentran en un rango más pequeño que los resultados con el móvil anterior pero mayor que con los resultados del móvil Ascend Y300 (Huawey):

Se puede observar que nos da resultados entre 1,5 y 3 se pueden considerar probables, las dos medidas coinciden únicamente en la frecuencia de 1000 Hz.

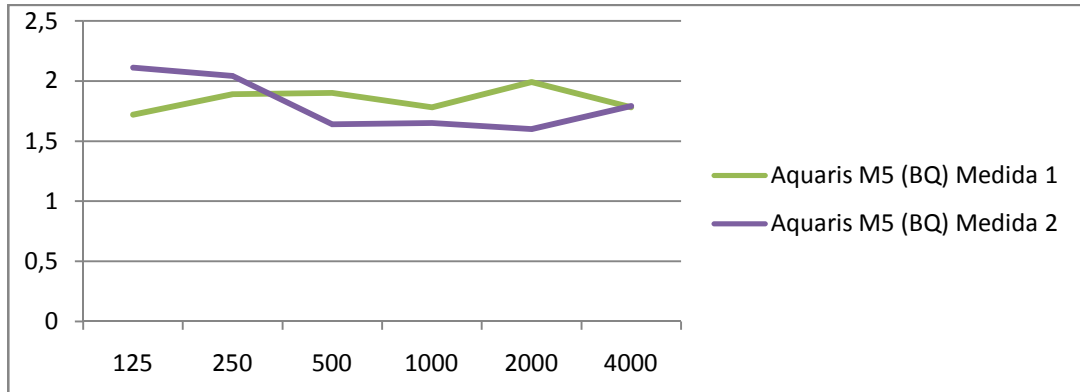
- Los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados con el móvil GTI 9300 (Samsung) como se ve en la grafica 4 se encuentran en un rango con tiempos de reverberación más bajos:



Gráfica 4: Ensayos sin absorbente con móvil GTI 9300 (Samsung)

Se puede observar que nos da resultados entre 1,6 y 2,5 que al igual que con el anterior móvil se pueden considerar algo fiables, y las dos medidas coinciden en la frecuencia de 4000 Hz.

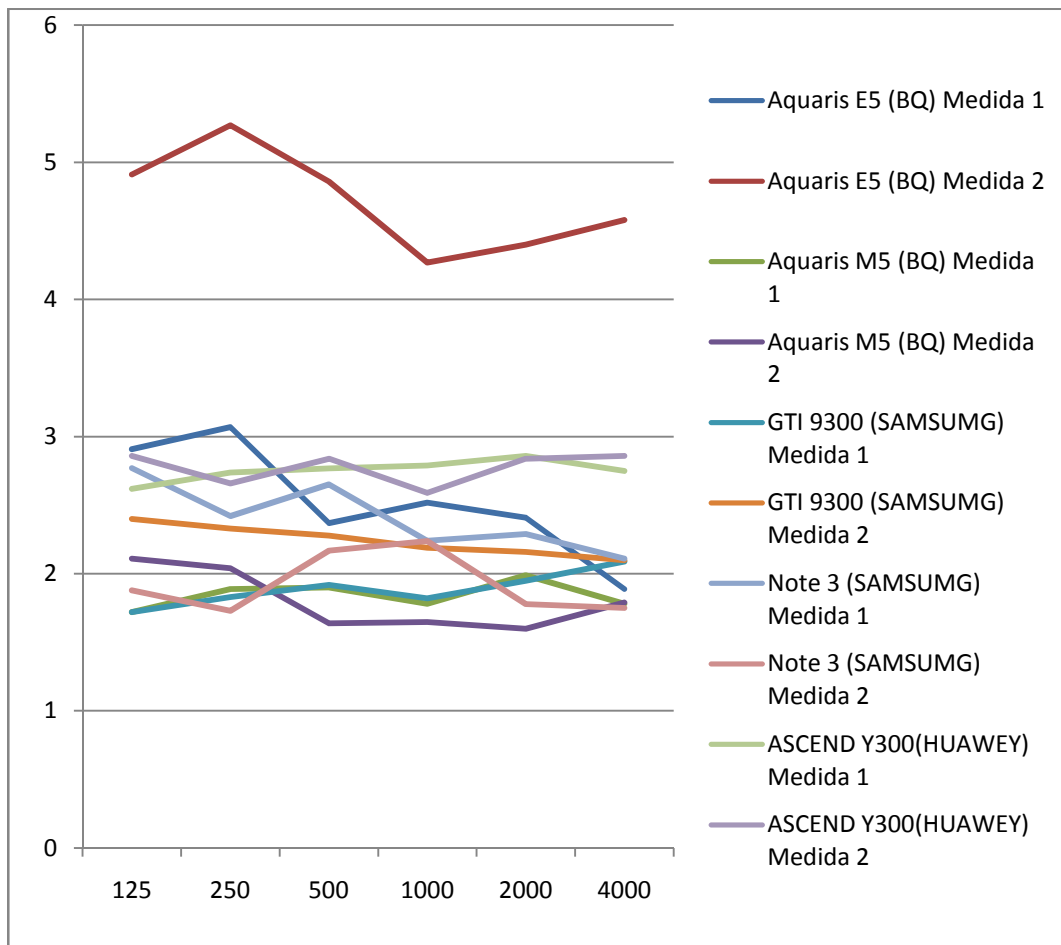
- Los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados con el móvil Aquaris M5 (BQ) como se ve en la grafica 5 se encuentran en un rango con tiempos de reverberación parecidos a los resultados de los móviles anteriores:



Gráfica 5: Ensayos sin absorbente con móvil Aquaris M5 (BQ)

Nos da resultados entre 1,6 y 2,2 que al igual que con el resto de los móviles son resultados muy elevados. Estas dos mediciones si coinciden en dos puntos en las frecuencias de 250 Hz y 4000Hz.

La comparación de todos los resultados se ven reflejado en la siguiente tabla, como se puede observar no coinciden los resultados de ningún móvil en ninguna de las frecuencias, se obtienen resultados incoherentes entre sí sin poder llegar a una conclusión lógica.



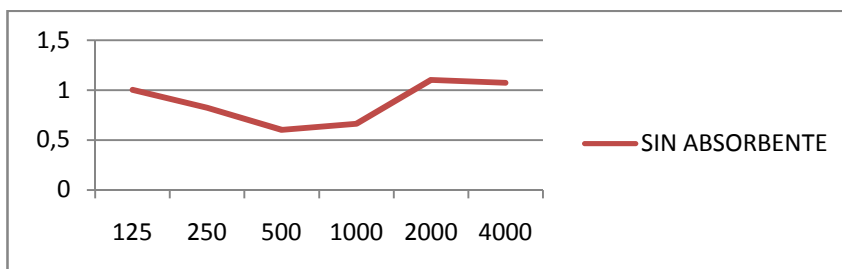
Gráfica 6: Comparación resultados de las distintas mediciones

6.1.2. Ensayo convencional in situ:

Tabla 4. Resultados ensayo convencional in situ	
Hz	SIN ABSORBENTE
125	1
250	0,82
500	0,6
1000	0,66
2000	1,1
4000	1,07

- Como se puede observar en la tabla 4 y en el gráfico 7 los resultados mediante ensayo convencional in situ mediante aparatos profesionales calibrados son muy diferentes a los dados mediante los móviles. Nos da resultados entre 0,6 y 1,07 que según los valores límites de

reverberación según el CTE DB HR Protección frente al ruido serían muy altos ya que considera en aulas y salas de conferencias vacías (sin ocupación y sin mobiliario), cuyo volumen sea menor que 350 m^3 (en nuestro caso el aula tiene $174,98 \text{ m}^3$), no será mayor que 0,7 s. Aun así son datos más cercanos a la norma que los obtenidos mediante la aplicación móvil.



Gráfica 7: Resultados obtenidos mediante ensayo convencional in situ

Si comparamos los resultados obtenidos mediante el sistema convencional con los obtenidos mediante la aplicación, se observa en la grafica 8, que los resultados obtenidos mediante el ensayo convencional in situ están muy por debajo de los realizados por los ensayos realizados mediante la aplicación con los distintos móviles.

Haciendo una comparación más exhaustiva de los dos tipos de ensayos, teniendo en cuenta las distintas frecuencias y obviando, como se dijo anteriormente, la medida primera realizada con el móvil Aquaris E5 (BQ), se puede afirmar que :

En frecuencias de 125 Hz, el resultado realizado con los móviles que más se aproxima al ensayo realizado mediante sistema convencional, es el realizado con el móvil Aquaris M5 (BQ) en la primera medición y el primer ensayo realizado con el móvil GTI 9300 (Samsung) ya con los dos se obtiene un resultado de 1,72 segundos; 0,72 segundos más altos que el valor obtenido mediante el sistema convencional. La diferencia máxima se obtiene con el móvil Aquaris E5 (BQ) con una diferencia de 1,91 segundos en relación al resultado obtenido mediante el sistema convencional.

En frecuencias de 250 Hz, el resultado de la segunda medición del móvil Note 3 (Samsung) es el que más se aproxima al resultado obtenido con el ensayo realizado mediante sistema convencional, con una diferencia de 0,91

segundos más altos. El resultado de la primera medición del móvil Aquaris E5 (BQ) vuelve a ser el resultado que más se aleja del resultado obtenido mediante el sistema convencional con una diferencia de 2,25 segundos por encima de este.

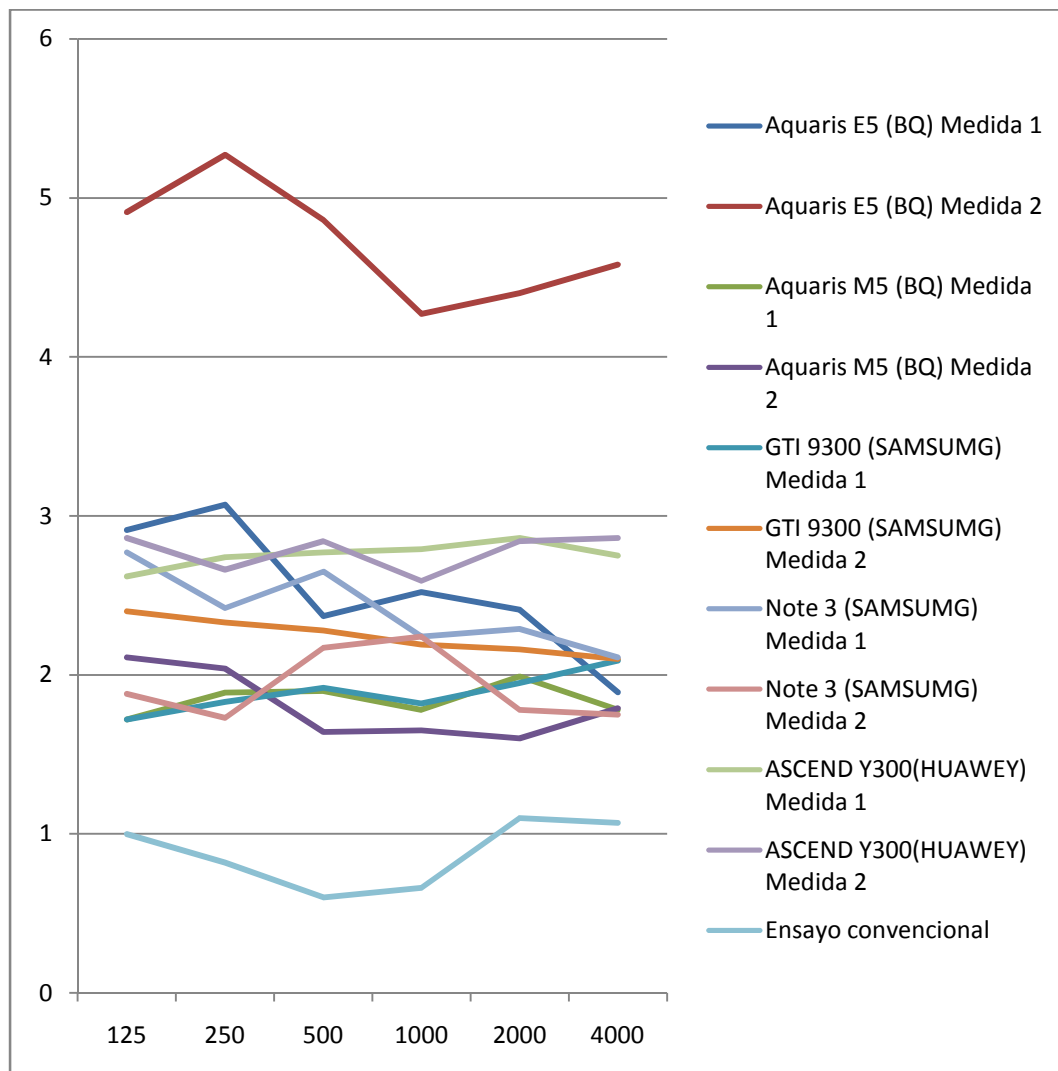
En frecuencias de 500 Hz, se obtiene una diferencia de 1,04 segundos por encima de la realizada mediante el ensayo convencional con la segunda medición realizada con el móvil Aquaris M5 (BQ) que es el resultado que más se aproxima al resultado del ensayo convencional. Y una diferencia máxima de 2,24 segundos por encima de la realizada mediante el método convencional, obtenida en la segunda medición con el móvil Ascend Y 300 (Huawey).

En frecuencias de 1000 Hz, el resultado realizado con los móviles que más se aproxima al ensayo realizado mediante sistema convencional, es el realizado con el móvil Aquaris M5 (BQ) en la segunda medición obteniendo un resultado de 0,99 segundos más altos que el valor obtenido mediante el sistema convencional. La diferencia máxima se vuelve a obtener con el móvil Ascend Y 300 (Huawey) en la primera medición con una diferencia de 1,76 segundos en relación al resultado obtenido mediante el sistema convencional.

En frecuencias de 2000 Hz, se obtiene una diferencia de 0,5 segundos por encima de la realizada mediante el ensayo convencional con la segunda medición realizada con el móvil Aquaris M5 (BQ) que es el resultado que más se aproxima al resultado del ensayo convencional. Y una diferencia máxima de 1,76 segundos por encima de la realizada mediante el método convencional, obtenida en la primera medición con el móvil Ascend Y 300 (Huawey).

En frecuencias de 4000 Hz, el resultado de la segunda medición del móvil Note 3 (Samsung) es el que más se aproxima al resultado obtenido con el ensayo realizado mediante sistema convencional, con una diferencia de 0,68 segundos más altos. El resultado de la segunda medición del Ascend Y 300 (Huawey) es el resultado que más se aleja del resultado obtenido mediante el sistema convencional con una diferencia de 1,79 segundos por encima de este.

Por lo visto anteriormente se puede afirmar que los resultados obtenidos con el móvil Aquaris M5 (BQ) y por el Note 3 (Samsung) son los que mas se aproximan a los resultados obtenidos mediante el ensayo convencional; y los resultados obtenidos mediante el móvil Ascend Y300 (Huawey) son los resultados que más se alejan de los obtenidos mediante el ensayo convencional, como se puede ver en la gráfica 8.



Gráfica 8: comparación resultados de los ensayos mediante aplicación y ensayo convencional

6.1.3. Estimación mediante formula de Sabine:

Tabla 5. Resultados ensayo mediante fórmula de sabine sin absorbentes														
Superficie Aula	Material	nº	Superficie				Coeficientes de absorción			αm	αmxS	4mV	A	Tr
			Ancho	alto		Total	500Hz	1000Hz	2000Hz					
suelo	Suelo de moqueta sobre hormigón	1	8,99	6,34	9,83	47,17	0,02	0,03	0,03	0,03	1,26	4,20	36,68	0,76
	Tarima imitación madera	1	4,83	2,00		9,66	0,02	0,03	0,03	0,03	0,26			
techo	falso techo	1	8,99	6,34	0,17	57,00				0,5	28,50			
paredes	Pared de ladrillo enlucida con yeso	2	8,99	3,07		55,20	0,02	0,03	0,04	0,03	1,66			
		2	6,34	3,07		38,93								
ventanas	Ventana de vidrio ordinaria	2	1,61	2,03		6,54	0,18	0,12	0,07	0,12	0,81			
		1	2,04	2,64		5,39								
Volumen Recinto total		1,00	8,99	6,34	3,07	175								

El tiempo de reverberación estimado mediante la fórmula de Sabine nos da 0,76 como se puede ver en la tabla 5, en ensayo mediante los móviles nos da muy por encima de este valor ya que todos los valores nos da mayores a 1,6 segundos.

6.2. Ensayos con absorbentes:

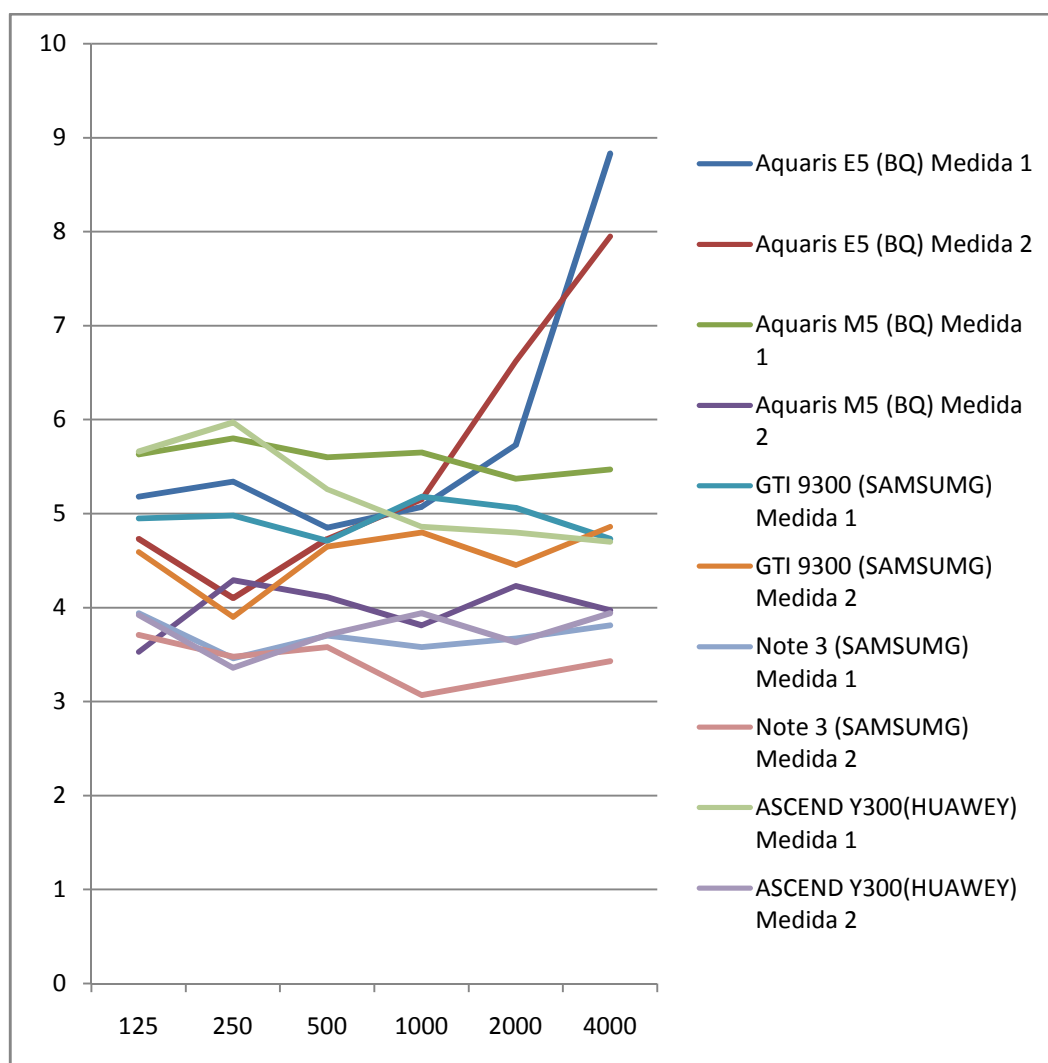
6.2.1. Ensayo mediante aplicación móvil:

Tabla 6. Resultados ensayo mediante aplicación										
CON ABSORBENTE										
Hz	AQUARIS E5 (BQ)		AQUARIS M5 (BQ)		GTI 9300 (SAMSUNG)		ASCEND Y300 (HUAWEI)		NOTE 3 (SAMSUNG)	
	medida 1	medida 2	medida 1	medida 2	medida 1	medida 2	medida 1	medida 2	medida 1	medida 2
125	5,18	4,73	5,63	3,53	4,95	4,59	5,66	3,92	3,94	3,71
250	5,34	4,1	5,8	4,29	4,98	3,9	5,97	3,36	3,46	3,48
500	4,85	4,73	5,6	4,11	4,71	4,65	5,26	3,71	3,7	3,58
1000	5,07	5,15	5,65	3,81	5,18	4,8	4,86	3,94	3,58	3,07
2000	5,73	6,62	5,37	4,23	5,06	4,45	4,8	3,63	3,67	3,25
4000	8,83	7,95	5,47	3,97	4,73	4,86	4,7	3,94	3,81	3,43

Podemos destacar como primera observación en la tabla 6 que los resultados obtenidos mediante la aplicación móvil incorporando absorbentes en el aula nos dan mayores que sin absorbentes. Estos resultados son erróneos ya que si incorporamos absorbentes en el aula el tiempo de reverberación se tiene que ver reducido y no al contrario como nos dan los resultados de la aplicación.

Al darnos resultados considerados erróneos se comparan los resultados de forma conjunta directamente (grafica 9):

Ocurre, al igual que con los resultados de los ensayos realizados sin absorbentes, que no coinciden los resultados de ningún móvil en ninguna de las frecuencias, se obtienen resultados de tiempos de reverberación altos no coincidentes con lo esperado.

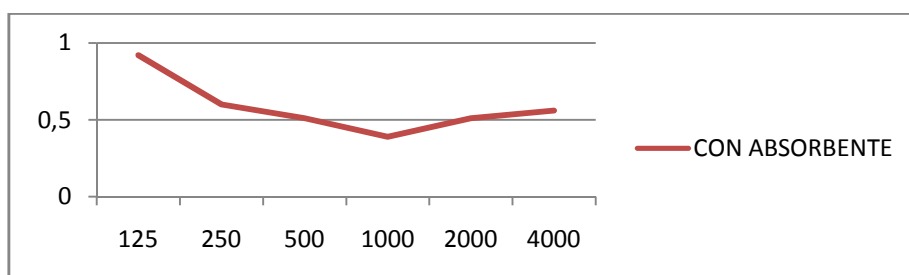


Gráfica 9: comparación resultados realizados con absorbentes mediante la aplicación con los distintos móviles

6.2.2. Ensayo convencional in situ:

Tabla 7. Resultados ensayo convencional in situ	
Hz	CON ABSORBENTE
125	0,92
250	0,6
500	0,51
1000	0,39
2000	0,51
4000	0,56

- Como ocurre con los ensayos realizados son absorbentes, se puede observar en la tabla 7y en el grafico 7, los resultados mediante ensayo convencional in situ mediante aparatos profesionales calibrados son muy diferentes a los dados mediante los móviles. Se obtienen resultados entre 0,39 y 0,92 cumpliríamos el CTE DB HR Protección frente al ruido ya que este nos da un valor global de 0,7 segundos y en el ensayo se obtiene un valor medio de 0,58 segundos.



Gráfica 10: Resultados obtenidos mediante ensayo convencional in situ con absorbentes

Si comparamos los resultados obtenidos mediante el sistema convencional con los obtenidos mediante la aplicación, como se vio con los ensayos realizados sin la incorporación de absorbentes se observa en la grafica 11, que los resultados obtenidos mediante el ensayo convencional in situ están muy por debajo de los realizados por los ensayos realizados mediante la aplicación con los distintos móviles.

Se realiza una comparación de los dos tipos de ensayos, como la realizada con los ensayos sin absorbentes, teniendo en cuenta las distintas frecuencias:

En frecuencias de 125 Hz, el resultado realizado con los móviles que más se aproxima al ensayo realizado mediante sistema convencional, es el realizado con el móvil Aquaris M5 (BQ) en la segunda medición 2,61 segundos más altos que el valor obtenido mediante el sistema convencional. La diferencia máxima se obtiene con el móvil Ascend Y 300 (Huawey) en la primera medición con una diferencia de 4,64 segundos en relación al resultado obtenido mediante el sistema convencional.

En frecuencias de 250 Hz, el resultado de la segunda medición del móvil Ascend Y 300 (Huawey) es el que más se aproxima al resultado obtenido con el ensayo realizado mediante sistema convencional, con una diferencia de 2,76 segundos más altos. El resultado de la primera medición del móvil Ascend Y 300 (Huawey) vuelve a ser el resultado que más se aleja del resultado obtenido mediante el sistema convencional con una diferencia de 5,37 segundos por encima de este.

En frecuencias de 500 Hz, se obtiene una diferencia de 3,07 segundos por encima de la realizada mediante el ensayo convencional con la segunda medición realizada con el móvil Note 3 (Samsung) que es el resultado que más se aproxima al resultado del ensayo convencional. Y una diferencia máxima de 5,09 segundos por encima de la realizada mediante el método convencional, obtenida en la primera medición con el móvil Aquaris M5 (BQ).

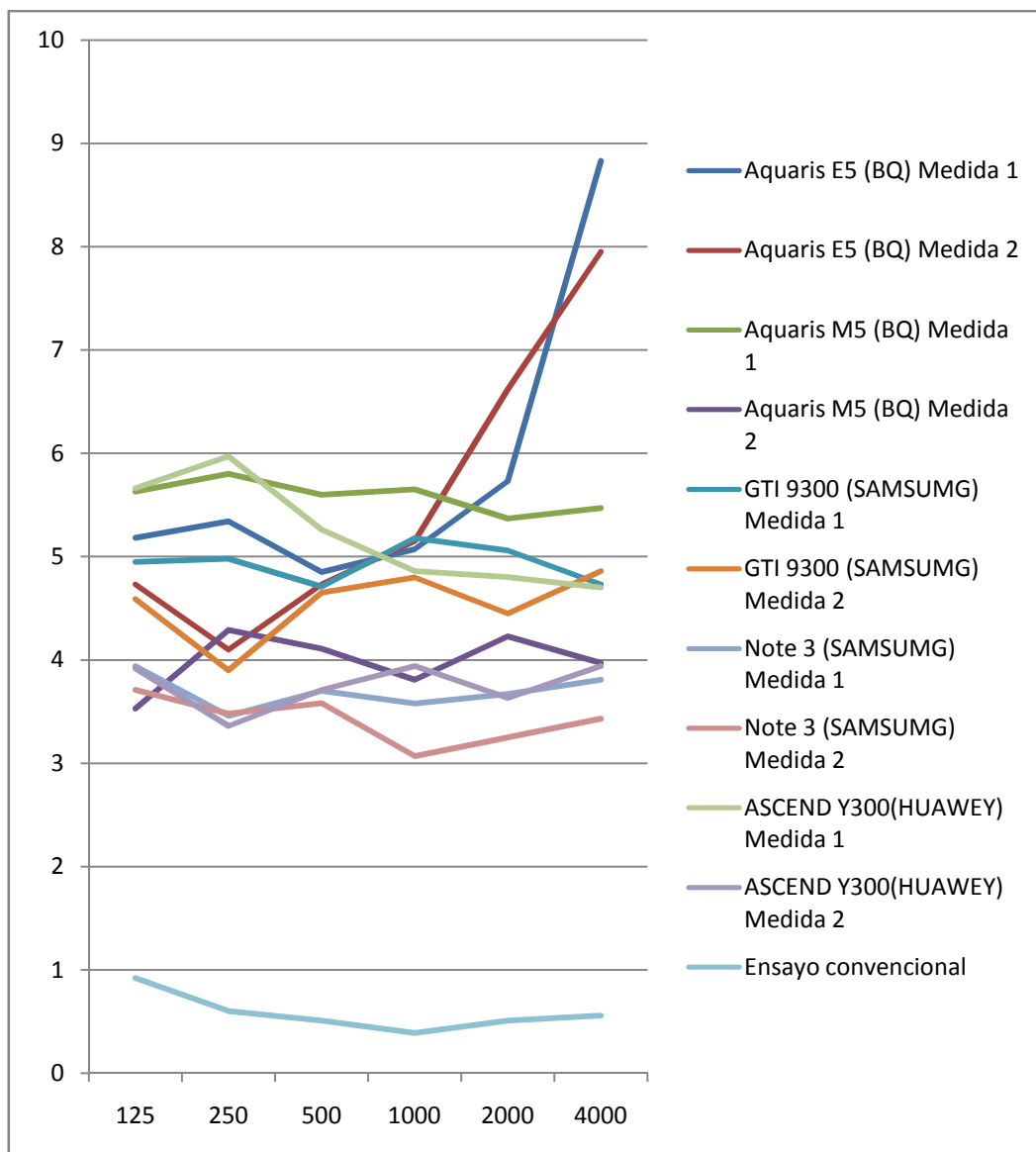
En frecuencias de 1000 Hz, el resultado realizado con los móviles que más se aproxima al ensayo realizado mediante sistema convencional, es el realizado con el móvil Note 3 (Samsung) en la segunda medición obteniendo un resultado de 2,68 segundos más altos que el valor obtenido mediante el sistema convencional. La diferencia máxima se vuelve a obtener con el móvil Aquaris M5 (BQ) en la primera medición con una diferencia de 5,26 segundos en relación al resultado obtenido mediante el sistema convencional.

En frecuencias de 2000 Hz, se obtiene una diferencia de 2,74 segundos por encima de la realizada mediante el ensayo convencional con la segunda medición realizada con el móvil Note 3 (Samsung) que es el resultado que más se aproxima al resultado del ensayo convencional. Y una diferencia máxima de 6,11 segundos por encima de la realizada mediante el método convencional, obtenida en la segunda medición con el móvil Aquaris E5 (BQ).

En frecuencias de 4000 Hz, el resultado de la segunda medición del móvil Note 3 (Samsung) es el que más se aproxima al resultado obtenido con el ensayo realizado mediante sistema convencional, con una diferencia de 2,84

segundos más altos. El resultado de la segunda medición del Aquaris E5 (BQ) es el resultado que más se aleja del resultado obtenido mediante el sistema convencional con una diferencia de 8,27 segundos por encima de este.

Por lo tanto se puede afirmar que los resultados obtenidos con el móvil Note 3 (Samsung) son los que más se aproximan a los resultados obtenidos mediante el ensayo convencional; y los resultados obtenidos mediante los móviles Aquaris E5 y M5 son los resultados que más se alejan de los obtenidos mediante el ensayo convencional, como se puede ver en la gráfica 11.



Gráfica 11: comparación resultados realizados con absorbentes mediante la aplicación con los distintos móviles

6.2.3. Estimación mediante fórmula de Sabine:

Tabla 8. Resultados ensayo mediante fórmula de sabine con absorbentes														
Superficie Aula	Material	nº	Superficie				Coeficientes de absorción			αm	αmxS	4mV	A	Tr
			Ancho	alto		Total	500Hz	1000Hz	2000Hz					
suelo	Suelo de moqueta sobre hormigón	1	8,99	6,34	9,83	47,17	0,02	0,03	0,03	0,03	1,26	4,20	44,51	0,63
	Madera	1	4,83	2,00		9,66	0,02	0,03	0,03	0,03	0,26			
techo	falso techo	1	8,99	6,34	0,17	57,00				0,50	28,50			
paredes	Pared de ladrillo enlucida con yeso	2	8,99	3,07		55,20	0,02	0,03	0,04	0,03	1,66			
		2	6,34	3,07		38,93								
	Material absorbente	20	0,5	1,00		10,00	0,70	0,80	0,85	0,78	7,83			
ventanas	Ventana de vidrio ordinaria	2	1,61	2,03		6,54	0,18	0,12	0,07	0,12	0,81			
		1	2,04	2,64		5,39								
Volumen Recinto total		1,00	8,99	6,34	3,07	175								

El tiempo de reverberación estimado mediante la fórmula de Sabine con absorbentes nos da 0,63 segundos un valor menor que el obtenido mediante la misma fórmula pero sin absorbentes.

7. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que los datos obtenidos mediante la aplicación móvil no son fiables:

En primer lugar, se pudo observar, cuando se realizaron los ensayos mediante la aplicación móvil, que el tiempo de reverberación con la aplicación, subía cuanto más tiempo se tardara en parar de medir mediante la aplicación, de este modo se pudo comprobar a priori que no era muy fiable este método ya que no tendrían que relacionarse dichas variables.

En segundo lugar se decide estudiar la aplicación RT, como se vio en el punto 5.3., ya que se considera la más precisa ya que nos da el resultado tanto en tiempo de reverberación promedio como en tercios de octavas es gratuita y tiene una buena valoración por los usuarios.

También se decide realizar el estudio con smartphones que tengan el sistema operativo Android, ya que como se vio en el punto 5.2. este sistema es el más usado actualmente y el que lanza más nuevas aplicaciones al mercado.

En tercer lugar, como se ha visto se realizan dos medidas con los distintos móviles tanto en los ensayos realizados incorporando absorbente como en los ensayos realizados sin absorbentes; observando los resultados obtenidos mediante las dos medidas con los distintos móviles se puede concluir que varía mucho los tiempos obtenidos con una medida a otra, teniendo en cuenta que se realiza con el mismo móvil y mismas condiciones.

Otro de nuestros objetivos era obtener el tiempo de reverberación de un aula de la escuela con material absorbente y sin material absorbente. Si comparamos los resultados obtenidos en el aula en condiciones normales y los resultados obtenidos una vez incorporadas las placas de absorbente, se observa que no tienen sentido los resultados obtenidos mediante la aplicación móvil, ya que son mucho mayores los tiempos de reverberación obtenidos con el material absorbente que sin él.

Podemos concluir dando una visión de la diferencia de usar los métodos convencionales in situ, mediante instrumentos profesionales para medir el

tiempo de reverberación, los métodos de estimación mediante fórmula de Sabine y los métodos realizados mediante la aplicación móvil, para Smartphone con sistema operativo Android, para medir el tiempo de reverberación. Teniendo en cuenta que los resultados proporcionados a partir de la aplicación son muy dispares a los resultados obtenidos mediante la estimación por medio de la fórmula de Sabine, como los obtenidos gracias al método convencional in situ, ya que mediante estos dos métodos nos dan tiempos de reverberación fiables y cumplen la normativa, son menores de 0,7 segundos, sin embargo los tiempos de reverberación obtenidos mediante la aplicación móvil se pueden considerar erróneos ya que nos dan tiempos de reverberación mayores a 1,6 en el caso de los ensayos sin absorbentes y mayores a 3,07 en el caso de los ensayos realizados con la incorporación de material absorbente.

El problema de no dar resultados fiables se puede justificar porque la precisión de la aplicación asegura una correcta calibración pero los desarrolladores de la aplicación deben hacer funcionar su aplicación en innumerables dispositivos, cada uno con hardware y firmware completamente distinto. Es inviable en la práctica disponer de una lista de dispositivos calibrados ya que, además, surgen otros dispositivos nuevos casi cada día. Parece difícil afirmar que una aplicación que mida el tiempo de reverberación cualquiera ejecutándose en un Smartphone indefinido realmente pueda dar resultados fiables. Este problema no existe para los sonómetros profesionales, ya que deben ser verificados individualmente y de forma periódica.

8. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Tras el estudio de la aplicación RT para medir el tiempo de reverberación se puede continuar evaluando este tipo de aplicación es mediante las siguientes propuestas:

- Analizar la misma aplicación con otro tipo de dispositivos

Este estudio se ha realizado con cinco tipos de dispositivos considerados de grado medio, se podría evaluar la misma aplicación u otras con otros smartphones más sofisticados o considerados de gama alta también se podría llevar a cabo el estudio mediante tablets ya que en la familia iOS iPhone, iPad el hardware está mucho más controlado y resultaría algo menos complicado conseguir una correcta calibración.

- Analizar la misma aplicación mediante el uso de un micrófono externo

Se puede proponer lo planteado en este estudio pero usando otros tipos de micrófonos externos de mayor calidad que el de nuestro Smartphone. Ya que consideramos que el defecto de la aplicación es debida a la deficiencia de calidad del micrófono de los smartphones.

- Estudiar otras aplicación que realicen los mismos estudios

Para realizar este estudio había muchas aplicaciones en el mercado disponibles, pero elegimos RT valorando los comentarios de los usuarios y el método de lectura de los resultados, por lo tanto se pueden estudiar estas otras aplicaciones para comprobar si nos mas fiables que la aplicación RT.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carrión, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Ediciones UPC.
- [2] casadevall, D. (s.f.). La acústica es la rama de la física que estudia el sonido. *acusticAweb* .
- [3] Abad Sorbet, M. Estudio acústico y Electroacustico de la sala de conciertos Ritmo y Compás (Madrid).
- [4] CTE (junio 2016) Documento Básico HR Protección frente al ruido
- [5] AENOR. (diciembre 2008). Medición de parámetros acústicos en recintos Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios (ISO 3382-2:2008) UNE_EN_ISO_3382_2-008
- [6] Carles, J. I. (2005). El marco acústico y su evolución. *Acústica y Arquitectura* .
- [7] Sánchez, A. (2013). Historia de la reverberación. *Diffusion magazine* .
- [8] casadevall, D. (2008, Octubre 27). La remodelación del Boston Symphony Hall por sabine. Retrieved junio 24, 2016
- [9] Hernandez Sánchez, G. y. (2013). Medidas del tiempo de reverberación: de los registradores de nivel analógicos a los sistemas portátiles de adquisición de datos en tiempo real. *Antena de Telecomunicación* .
- [10] Brüel and Kjaer. (n.d.).
- [11] Moreno gálvaez, F. J. (2011). Estudio acústico y simulación del acondicionamiento del local de conciertos de la union Musical de Higuieruelas.
- [12] puromarketing. uso de apps móviles 2015.
- [13] distrendia. Mobile en España y en el Mundo 2015.
- [14] Roca peinado, David. (2014) estudio de las principales variables de ejecución en ensayo según une-en 140-7 ruido de impacto.
- [15] Caballol Bartolomé, David. Tesis Doctoral. 2013. Evolución histórica y comportamiento acústico a ruido aéreo y de impactos de los forjados de la Ciudad Universitaria de Madrid.

- [16] carrascal Garcia, Maria teresa, Romero Fernandez, Amelia (junio 2015)I Jornadas de Investigación en Construcción. Actas de las Jornadas. T. II. Caracterización acústica de elementos constructivos habituales en la edificación residencial española, mediante ensayos en obra y en laboratorio
- [17] Simon Khalaf, S. P. (2015). Media, Productivity & Emojis Give Mobile Another Stunning Growth Year. Flurry analytics Blog .
- [18] Laguna, M. (s.f.). Porque un movil no es un sonometro.

ANEXO I
INFORMES CESVA

Tiempo de reverberación In situ según la norma ISO 3382

Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos

Fecha de la prueba : miércoles, 30 de abril de 2014

Identificación del recinto de medición : Sala B ETSEM

Descripción :

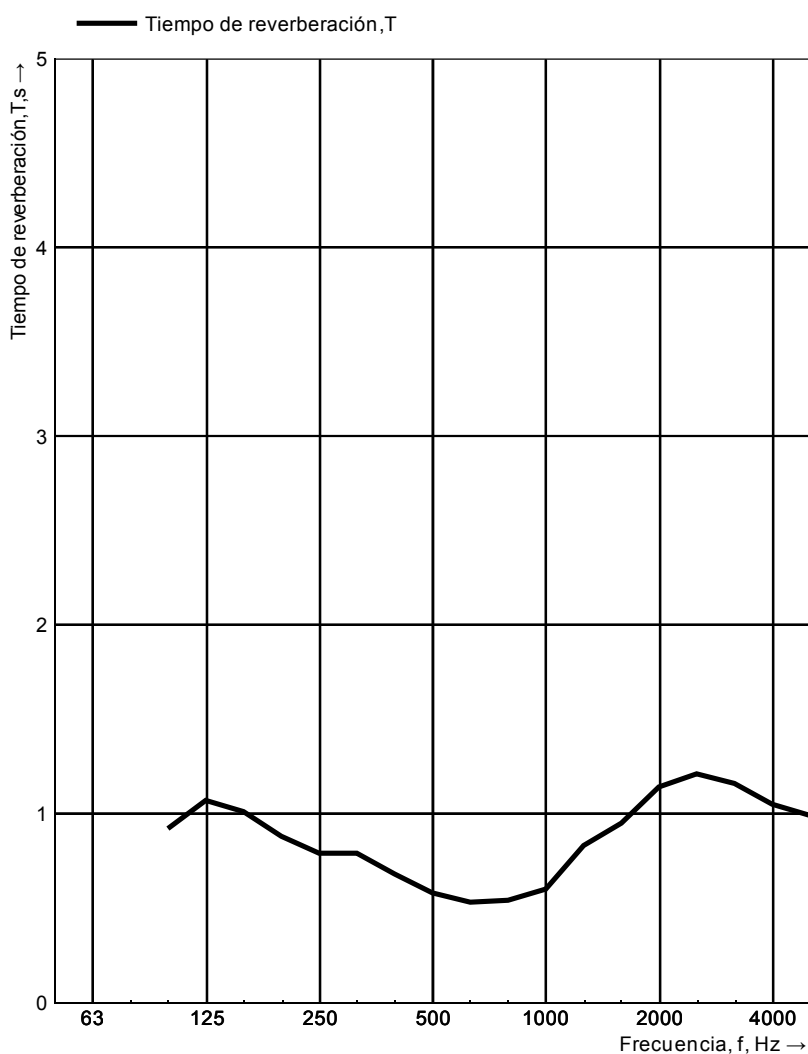
Ensayo realizado por David Caballol

Temperatura : 24,0 °C

Humedad : 70 %

Volumen : 175,00 m³

Frecuencia f Hz	T (1/3 de octava) s
100	0,92
125	1,07
160	1,01
200	0,88
250	0,79
315	0,79
400	0,68
500	0,58
630	0,53
800	0,54
1000	0,60
1250	0,83
1600	0,95
2000	1,14
2500	1,21
3150	1,16
4000	1,05
5000	0,99



Valoración de acuerdo a la Norma ISO 3382

$$T_{\text{mid},400-1250} = 0,63 \text{ s}; \quad T_{\text{mid},400-2500} = 0,78 \text{ s};$$

Evaluación basada en resultados medidos in situ obtenidos mediante un método de ingeniería(1/3 de octava)

N. del informe : 3

Nombre del instituto de medida : ETSEM

Fecha : miércoles, 30 de abril de 2014

Firma :

Tiempo de reverberación In situ según la norma ISO 3382
Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos

Fecha de la prueba : lunes, 14 de marzo de 2016

Identificación del recinto de medición :

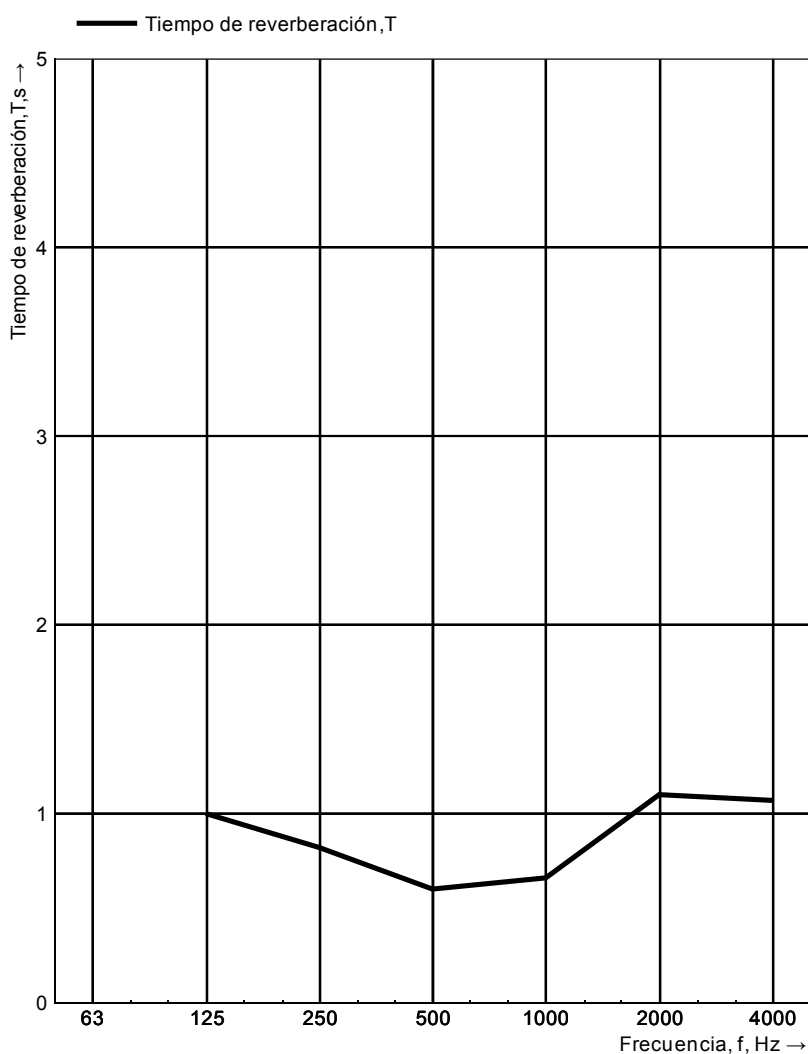
Descripción :

Temperatura : 24,0 °C

Humedad : 70 %

Volumen : 175,00 m³

Frecuencia f Hz	T (octavas) s
125	1,00
250	0,82
500	0,60
1000	0,66
2000	1,10
4000	1,07



Valoración de acuerdo a la Norma ISO 3382

$$T_{\text{mid},500-1000} = 0,63 \text{ s}; \quad T_{\text{mid},500-2000} = 0,79 \text{ s};$$

Evaluación basada en resultados medidos in situ obtenidos mediante un método de ingeniería(octavas)

N. del informe :

Nombre del instituto de medida :

Fecha : lunes, 14 de marzo de 2016

Firma :

Tiempo de reverberación In situ según la norma ISO 3382

Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos

Fecha de la prueba : lunes, 14 de marzo de 2016

Identificación del recinto de medición : Sala B ETSEM

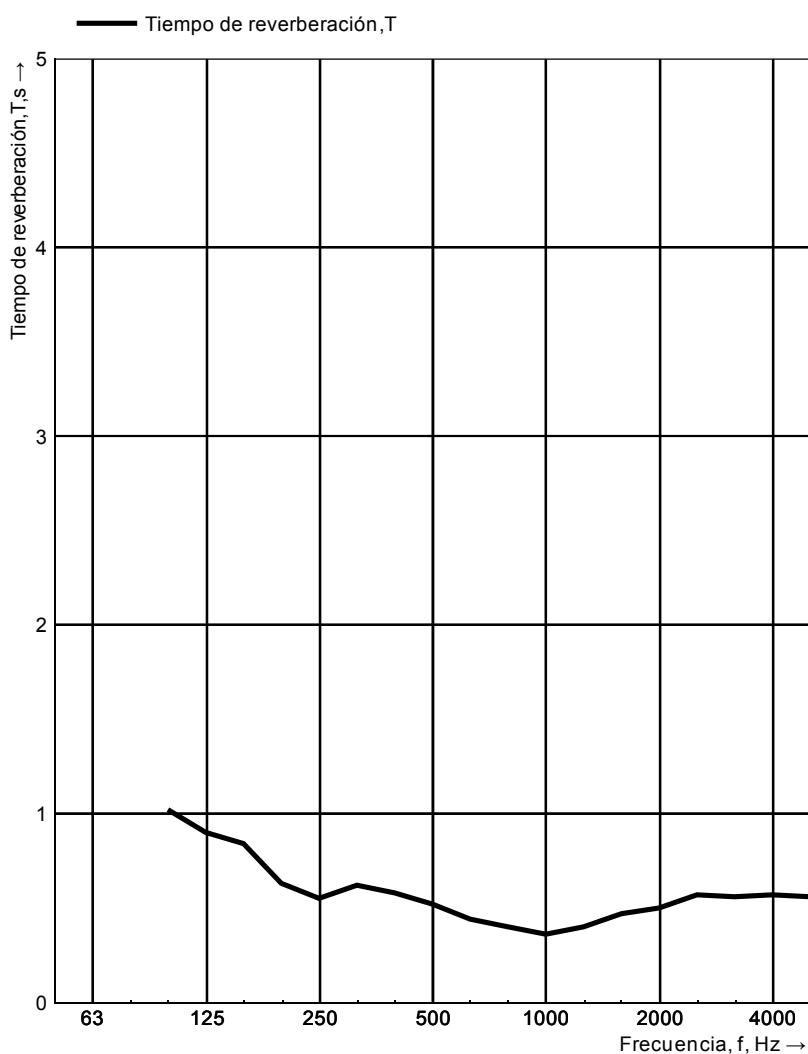
Descripción :
Sala B con absorbentes

Temperatura : 18,6 °C

Humedad : 30 %

Volumen : 175,00 m³

Frecuencia f Hz	T (1/3 de octava) s
100	1,02
125	0,90
160	0,84
200	0,63
250	0,55
315	0,62
400	0,58
500	0,52
630	0,44
800	0,40
1000	0,36
1250	0,40
1600	0,47
2000	0,50
2500	0,57
3150	0,56
4000	0,57
5000	0,56



Valoración de acuerdo a la Norma ISO 3382

$$T_{\text{mid},400-1250} = 0,45 \text{ s}; \quad T_{\text{mid},400-2500} = 0,47 \text{ s};$$

Evaluación basada en resultados medidos in situ obtenidos mediante un método de ingeniería(1/3 de octava)

N. del informe : 3

Nombre del instituto de medida : DCAC-ETSEM UPM

Fecha : lunes, 14 de marzo de 2016

Firma :

Tiempo de reverberación In situ según la norma ISO 3382
Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos

Fecha de la prueba : lunes, 14 de marzo de 2016

Identificación del recinto de medición : Sala B ETSEM

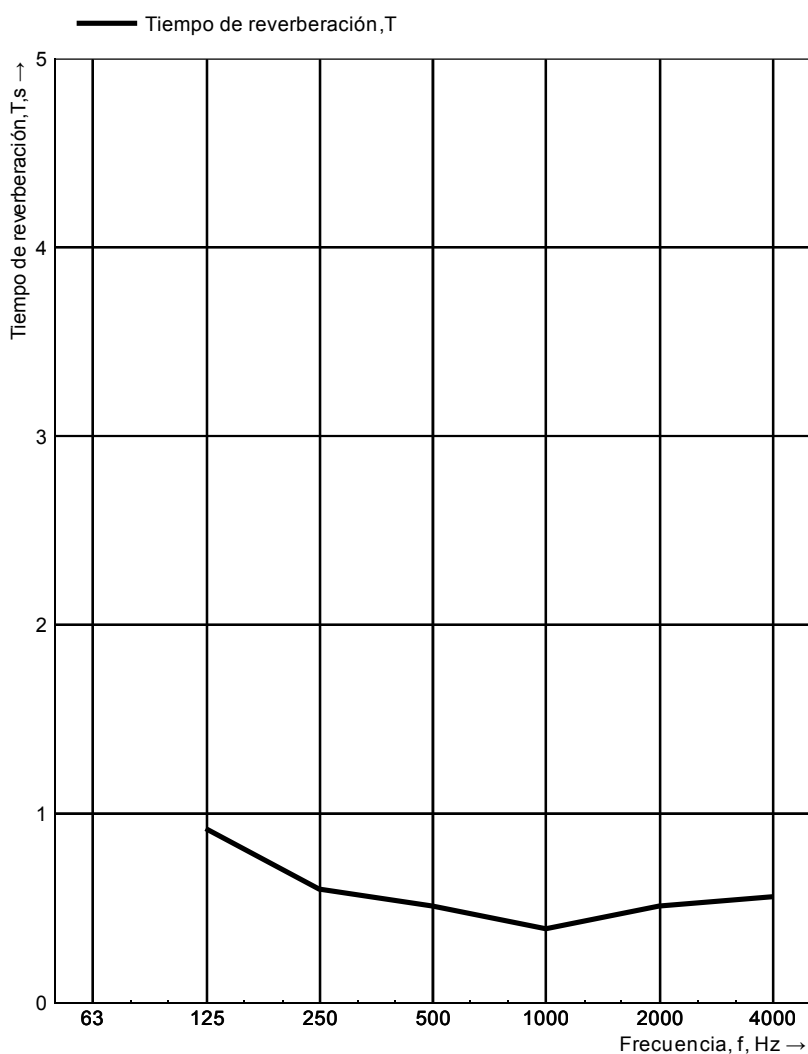
Descripción :
 Sala B con absorbentes

Temperatura : 18,6 °C

Humedad : 30 %

Volumen : 175,00 m³

Frecuencia f Hz	T (octavas) s
125	0,92
250	0,60
500	0,51
1000	0,39
2000	0,51
4000	0,56



Valoración de acuerdo a la Norma ISO 3382

$$T_{\text{mid},500-1000} = 0,45 \text{ s}; \quad T_{\text{mid},500-2000} = 0,47 \text{ s};$$

Evaluación basada en resultados medidos in situ obtenidos mediante un método de ingeniería(octavas)

N. del informe : 4

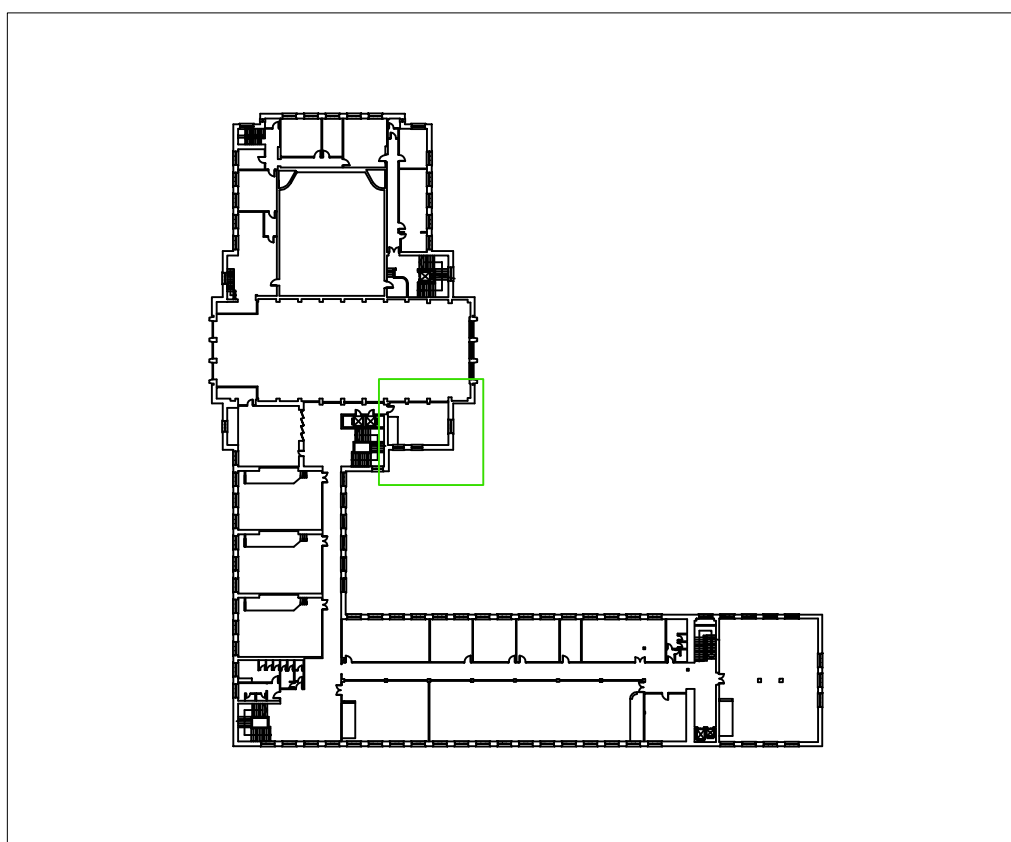
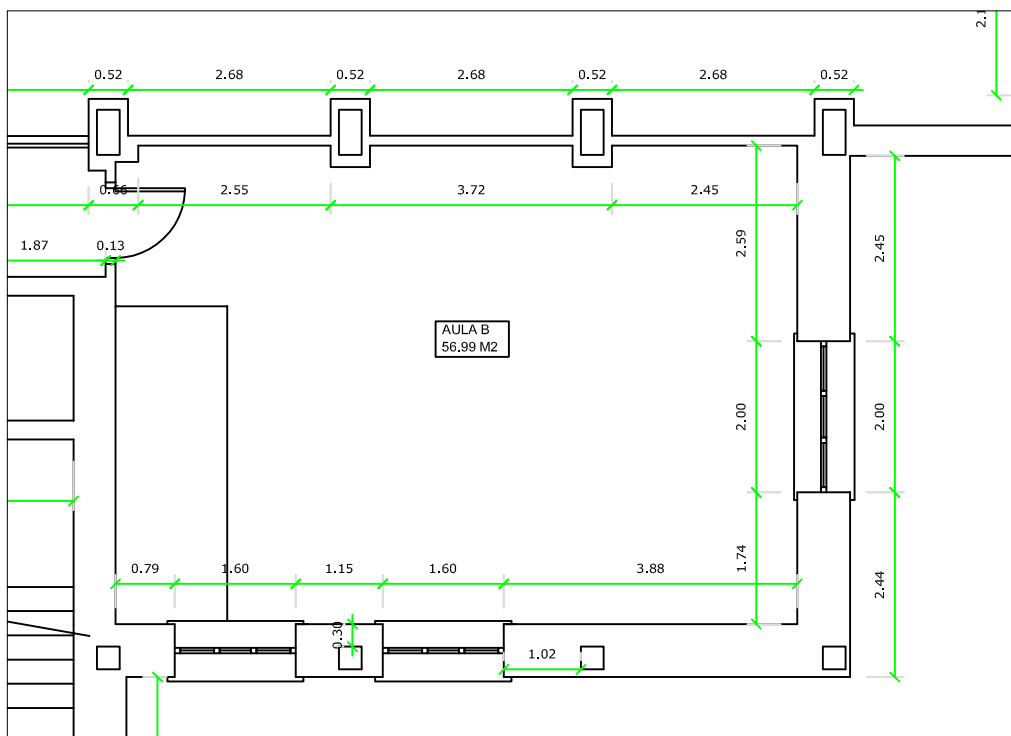
Nombre del instituto de medida : DCAC-ETSEM UPM

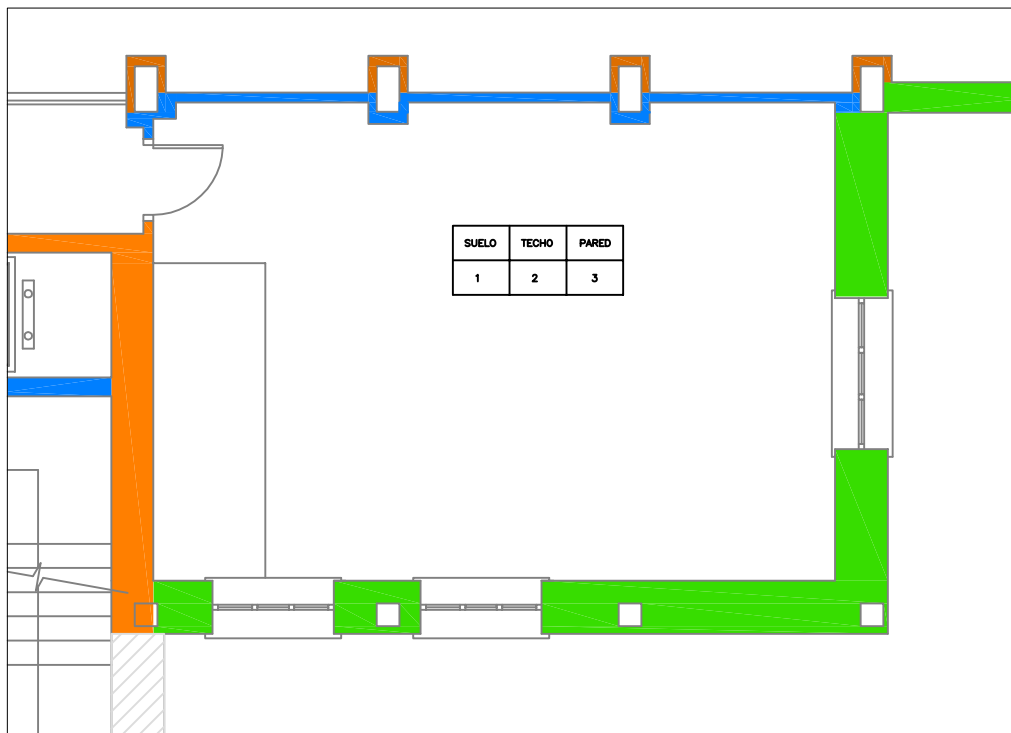
Fecha : lunes, 14 de marzo de 2016

Firma :

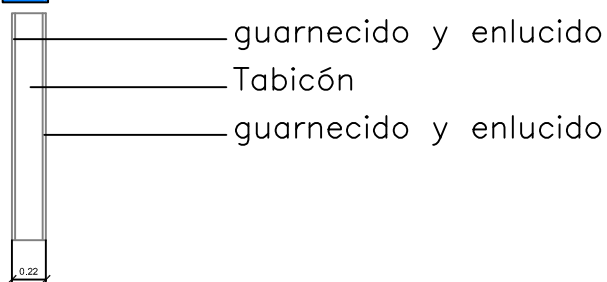
ANEXO II

PLANOS AULA B



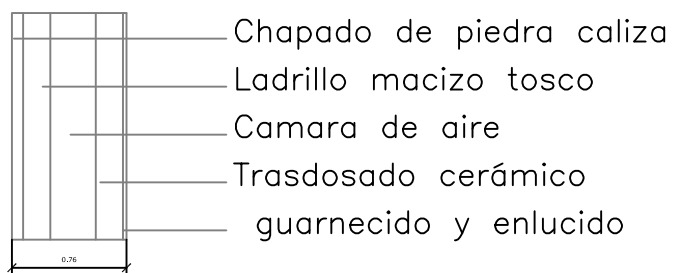


TIPO I

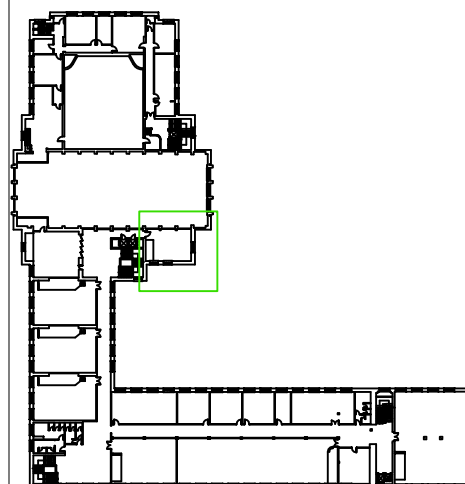
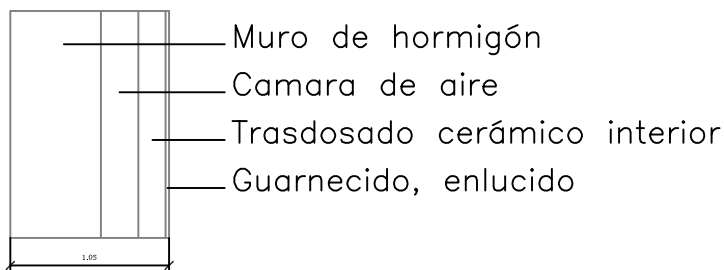


- 1.- MOQUETA
- 2.- PINTURA AL TEMPLE
- 3.- FALSO TECHO DE PLACAS DE YESO LAMINADO

TIPO II



TIPO III



ANEXO III

ANEXO FOTOGRÁFICO



Figura 31: ensayo aula B con absorbentes mediante aplicación móvil y Fuente sonora



Figura 32: Ensayo Aula b con absorbentes. Fuente sonora y sonómetro.